



FACULTAD DE MEDICINA HUMANA Y CIENCIAS DE LA SALUD

ESCUELA PROFESIONAL DE FARMACIA Y BIOQUIMICA

TESIS

“ADSORCIÓN DE CADMIO CON CARBÓN ACTIVADO”

Para obtener el título profesional de Químico Farmacéutico

BACHILLER

Laupa LLactas, Haydee Gladys

ASESOR

QF. Miranda Paredes, Jean Paul

2016

Dedico este trabajo a Dios por la oportunidad que me dio de vivir experiencias y guiarme en cada momento de mi vida. A mis padres, hermanos y amistades por su gran apoyo incondicional.

Se agradece por su contribución para el desarrollo de esta tesis al Dr. Paul Mendoza Murillo y QF. Jean Paul Miranda Paredes por su acertada asesoría, cooperación y sugerencias para el desarrollo de este trabajo y al Ing. Quím. Manuel Chávez por su apoyo incondicional en la culminación de este trabajo de tesis.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó con la finalidad de demostrar, la capacidad de adsorción del carbón activado sobre la disolución acuosa con el ión cadmio, que es un metal pesado que se encuentra en las aguas residuales de las grandes industrias mineras, aguas potables, aguas superficiales y este metal es altamente toxico, hasta en pequeñas concentración. El ión cadmio como Cd^{2+} es capaz de ser asimilado, almacenado y concentrado por el organismo. Este es no biodegradable y viaja a través de la cadena alimenticia. Tiene un tiempo de vida biológico medio de 10 a 35 años en humanos. Concentraciones establecidas OMS: 0.003mg/L; Determinación de cadmio en sangre los niveles deben ser inferiores a 5ug/L de sangre total.

El carbón activado se caracteriza por su capacidad adsorbente se ve favorecida por la estructura porosa y además de las reacciones químicas en su superficie están influenciadas por centros activos, dislocaciones y discontinuidades, donde los carbones tienen electrones desapareados y valencias insaturados presentando mayor energía potencial. Se empleó la técnica de absorción atómica con horno de grafito y un equipo Perkin Elmer modelo Analyst 800.

La capacidad de adsorción de cadmio es de 3.720 mg/g en un tiempo de 100 minutos. La Gráfica de la cinética está representada, por el modelo de la cinética de pseudo-segundo orden con q_e experimental 3.825mg/g, q_e teórico 3.823mg/g y R^2 1.0000. Los dos parámetros son que a mayor temperatura será mayor la adsorción y pH cercano al neutro su actividad de adsorción es óptimo llegando a su máxima capacidad; pH 4 su q_e es 3.050mg/g, pH 7 su q_e es 3.700mg/g y pH 9 q_e es 3.420 mg/g.

ABSTRACT

The following research trial was conducted to demonstrate the absorption capacity of the activated carbon to the aqueous solution with cadmium ion, which is a heavy metal highly toxic even in small concentrations, that is found in waste water from large mining industries, drinking water, surface water. Cadmium ion as Cd^{2+} is capable of being assimilated, stored and concentrated by the body. It is not biodegradable and travels through the food chain. It has a biological half-life between 10 to 35 years in humans. WHO established concentrations: 0.003mg/L; when cadmium is determined in blood, levels should be below 5ug/L of whole blood.

Activated carbon is characterized by its absorbent capacity which is favored by the porous structure and also of the chemical reactions on the surface are influenced by active centers, dislocations and discontinuities where coals are unpaired electrons and unsaturated valences presenting greater potential energy.

The Atomic Absorption Technique with graphite furnace and a Perkin Elmer Model Analyst 800 was used.

The absorption capacity of cadmium is 3.720 mg/g in a time of 100 minutes. The graph displayed by the kinetic model of pseudo-second order experimental q_e of 3.825 mg/g, theoretical q_e of 3.823 mg/g and R^2 of 1.0000. The two parameters are that the higher temperature, the greater adsorption and the near neutral pH its adsorption activity is optimum reaching its maximum capacity, pH 4 its q_e is 3.040 mg/g, pH7 its q_e is 3.700 mg/g and pH 9 its q_e 3.420 mg/g.

ÍNDICE

CARÁTULA.....	I
DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	XII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII

CAPITULO I: PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática	18
1.2 Formulación del problema.....	19
1.3 Objetivos de la Investigación	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivo Específico.....	19
1.4 Hipótesis de la Investigación.....	20
1.4.1 Hipótesis General.....	20
1.4.2 HipótesisEspecíficos.....	20

1.5	Justificación e Importancia de la investigación.....	21
1.5.1	Justificación de la Investigación.....	21
1.5.2	Importancia de la Investigación.....	22
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO		
2.1	Antecedentes de la Investigación.....	23
2.1.1	Internacionales.....	23
2.1.2	Nacionales.....	24
2.2	Bases Teóricas.....	24
2.2.1	Adsorción.....	24
2.2.1.1	Adsorción química.....	27
2.2.1.2	Adsorción física.....	27
2.2.1.3	Adsorción de especies iónicas.....	28
2.2.1.4	Modelos Cinéticos.....	28
	a) Modelo cinético de pseudo primer orden.....	28
	b) Modelo cinético de pseudo segundo orden.....	29
	c) Modelo cinético de difusión intraparticular.....	30
2.2.1.5	Isotermas de adsorción.....	31
	a) Isoterma de Langmuir.....	35
	b) Isoterma de Freundlinch.....	37
	c) Isoterma de Elovich.....	38
	d) Isoterma de Temkim.....	39

e) Isoterma de Giles.....	39
f) Isoterma BET.....	41
g) Isoterma de Redlich-Peterson.....	41
2.2.2 Cadmio.....	43
2.2.2.1 Fuentes, usos y características.....	43
2.2.2.2 Riesgos para la Salud	44
2.2.2.3 Toxicidad.....	46
2.2.3 Carbón Activado.....	47
2.2.3.1 Estructura y propiedades químicas.....	49
2.2.3.2 Formas y aplicaciones.....	51
2.2.3.3 Preparación de carbón activado.....	52

CAPITULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de Investigación.....	56
3.1.1 Método.....	56
3.1.2 Técnica.....	56
3.1.3 Diseño.....	56

3.2	Población y muestreo de la investigación.....	57
3.2.1	Población.....	57
3.2.2	Muestra.....	57
3.3	Variables e Indicadores.....	57
3.4	Técnica e Instrumentos de Recolección de Datos.....	58
3.4.1	Técnicas.....	58
3.4.2	Instrumentos	58

CAPITULO IV: PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

DE RESULTADOS

4.1	Materiales, equipos y métodos.....	59
4.1.1	Métodos estadísticos.....	60
4.2	Cinética de la adsorción de cadmio sobre carbón Activado.....	61
4.2.1	Determinación de las concentraciones de cadmio en solución.....	61
4.3	Evaluación de los parámetros de adsorción.....	62
4.3.1	Cinética de la adsorción de cadmio sobre carbón activado.....	62
4.3.2	Determinar el orden de las cinéticas de reacción.....	64

4.3.3 Efecto de la temperatura sobre la adsorción de	
Cadmio sobre carbón activado.....	71
4.3.4 Efecto del pH sobre la adsorción de cadmio sobre	
carbón activado.....	73
DISCUSIÓN.....	76
CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIONES.....	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXOS.....	86
GLOSARIO.....	103

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1. Cinética de la adsorción de cadmio sobre carbón activado.....	63
Tabla 2. Datos obtenidos al aplicar el modelo de pseudo primer orden.....	66
Tabla 3. Datos obtenidos al aplicar el modelo de pseudo segundo orden.....	69
Tabla 4. Evaluación de la cinética de la adsorción de cadmio sobre carbón activado modificado.....	71
Tabla 5. Efecto de la temperatura en la capacidad de adsorción de cadmio con carbón activado.....	72
Tabla 6. Efecto pH en la capacidad de adsorción de cadmio sobre carbón activado.....	74
Tabla 7. Lista de sustancias peligrosas de acuerdo a ATSDR y EPA. Año 2011.....	101
Tabla 8. Cantidad de cadmio adsorbida por el carbón activado a diferente concentración de sorbente.....	102

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Estructura porosa del carbón activado.....	88
Gráfico 2. Tipos de isotermas de adsorción.....	88
Gráfico 3. Principales isotermas de adsorción en el sistema sólido – líquido ^{2, 19,20}	89
Gráfico 4. Isotermas de adsorción establecida por Giles para un sistema sólido- líquido ^{8, 25}	90
Gráfico 5. Isotermas de adsorción física según la IUPAC. Modelo BET	90
Gráfico 6. Carbón activo granular y polvo.....	91
Gráfico 7. Representación esquemática de los principales grupos superficiales.....	91
Gráfico 8. Representación esquemática de los principales grupos superficiales.....	92
Gráfico 9. Representación esquemática del carácter ácido de algunos grupos oxigenados y básicos.....	92
Gráfico 10. Reacción química donde se elimina átomos de carbono.....	93
Gráfico 11. Estructura de carbón.....	93
Gráfico 12. Placas graníticas.....	93
Gráfico 13. Formas y formatos de carbón activado.....	94
Gráfico 14. Ciclo de histéresis según la clasificación de la IUPAC ¹⁸	94
Gráfico 15. Isoterma Típica de Disolución.....	95

Gráfico 16. Macroporos y Mesoporos en los gránulos de carbón activado.....	95
Gráfico 17. Principales materias primas y tecnologías de activación utilizadas en la producción.....	96
Gráfico 18. Isoterma de adsorción del ión cadmio ²	96
Gráfico 19. Curvas cinéticas de adsorción de fenol con carbón activado ⁸	97
Gráfico 20. Curvas cinéticas de adsorción de fenol con carbón activado ⁸ . Modelo de pseudo primer orden.....	97
Gráfico 21. Curvas cinéticas de adsorción de fenol con carbón activado ⁸ . Modelo de pseudo segundo orden.....	98
Gráfico 22. Curvas cinéticas de adsorción de la serie AG a distintas temperaturas ²	98
Gráfico 23. Curvas cinéticas de adsorción de la serie AG a distintas temperaturas ²	99
Gráfico 24. Curvas cinéticas de adsorción de la serie AG a distintas temperaturas ²	99
Gráfico 25. Curvas cinéticas de adsorción de la serie AG a distinto pH.....	100
Gráfico 26. Sorción de cadmio por el carbón activado a diferentes concentraciones del sorbente.....	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva cinética de adsorción de cadmio con carbón activado.....	64
Figura 2. Gráfica de la cinética de pseudo-primer orden, forma lineal.....	67
Figura 3. Gráfica de la cinética de pseudo-segundo orden forma lineal.....	70
Figura 4. Evaluación de la cinética de la adsorción de cadmio sobre carbón activado modificado.....	71
Figura 5. Efecto de la temperatura sobre la eficiencia de adsorción.....	72
Figura 6. Efecto pH en la capacidad de adsorción de cadmio sobre carbón activado.....	75

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AG = carbón activado obtenido a partir de aguaje.

OMS= organización mundial de la salud.

R²= coeficiente de correlación.

mg = miligramos.

ug = microgramos.

pH = potencial de hidrógeno.

IUPAC= unión internacional de química pura y aplicada.

m= masa.

q_e (mg.g⁻¹) = es la capacidad de adsorción o concentración del adsorbato en el sólido en condición de equilibrio.

q_t (mg.g⁻¹) = es la capacidad de adsorción o concentración del adsorbato en el sólido a un tiempo t.

K₁(min⁻¹) = es la constante de velocidad del modelo de pseudo primer orden.

t (min) = es el tiempo empleado en el ensayo de adsorción.

K₂(g.mg⁻¹. min⁻¹) = es la constante de velocidad del modelo de pseudo segundo orden.

K_{dif}= es la constante del modelo de difusión intraparticular (mg.g⁻¹. min^{-0.5}).

C_o (mg.L⁻¹) = es la concentración inicial del adsorbato.

C_e ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) = es la concentración del adsorbato en equilibrio.

$V(\text{L})$ = es el volumen de la solución.

INTRODUCCIÓN

Los carbones activados presentan una considerable capacidad de adsorción de diversos compuestos, tanto en fase gaseosa y líquida, principalmente gracias a su estructura porosa altamente desarrollada que les confiere una gran superficie específica.¹

El interés por la remoción del ion cadmio presente en el agua toma una vital importancia en nuestra época debido a dos importantes factores: el mayor volumen de tóxicos que se vierten en el agua generado por las industrias y a una mayor concientización de las instituciones gubernamentales y la población en general. La búsqueda de mejores opciones ha incentivado el desarrollo de investigaciones encaminadas a la síntesis de nuevos materiales adsorbentes o diseñar nuevos procesos de purificación de agua.²

El cadmio no se encuentra en el ambiente como un metal puro; es más abundante en la naturaleza en forma de óxidos complejos, sulfuros y carbonatos. Sus variadas aplicaciones en la galvanoplastia, galvanostelgia y la galvanización, así como su uso en plásticos, pigmentos para crear tintes, pinturas y cerámicas, baterías de níquel y cadmio, se deben a la gran resistencia a la corrosión y a sus propiedades electroquímicas. Las principales fuentes de exposición al cadmio con riesgo considerable para la salud humana; la comida y los cigarrillos la cual puede ser de carácter crónico. Los efectos tóxicos del ion cadmio se manifiesta especialmente en los huesos y los riñones como las personas que tienen pocas reservas de hierro son los más vulnerables a estos efectos adversos.³

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la Realidad Problemática

A nivel industrial el carbón activado es utilizado ampliamente para la purificación de agua debida a su bajo costo y fácil implementación, así como a su gran versatilidad ya que su estructura porosa y la naturaleza química en su superficie puede ser controlada para una necesidad específica. Diversas investigaciones han demostrado que los materiales lignocelulósicos son una materia prima adecuada para la producción de carbón activado. A nivel mundial, la principal materia prima usada para la producción es la cascara de coco; nuestro país importa el 95% de su demanda que alcanza a nivel nacional las 1354 toneladas anuales⁴.

Entre uno de los metales pesados con mayor presencia y toxicidad en el ambiente encontramos al cadmio⁵. Este metal no es biodegradable y se asimila, almacena y concentra en los organismos vivos viajando a través de la cadena alimenticia. La legislación peruana⁶, de acuerdo al D.S. N° 002-2008- MINAM, tiene como límite máximo permisible de cadmio en el agua potable los 0.003 mg/L.

Entre los procesos aplicados al tratamiento del agua están: precipitación, osmosis reversa, reacciones de reducción avanzada, intercambio iónico, adsorción entre otros.⁷

1.2 Formulación del problema

¿Cuál será la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

OGDeterminar la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado.

1.3.2 Objetivos Específicos

OE1Determinar la diferencia de la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado a diferente temperatura.

OE2Determinar la diferencia de la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado a diferente pH.

1.4 Hipótesis de la Investigación

1.4.1 Hipótesis General

HG El carbón activado tendrá la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa.

1.4.2 Hipótesis Específicos

HE1 El carbón activado tendrá diferente capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa a diferente temperatura.

HE2 El carbón activado tendrá diferente capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa a diferente pH.

1.5 Justificación e Importancia de la Investigación

1.5.1 Justificación de la Investigación

El agua es un recurso esencial para la vida, pero debido a la irresponsabilidad de las personas y a la ausencia de regulaciones gubernamentales que controlen la emisión de los efluentes domésticos e industriales, las diversas fuentes de agua se encuentran en muchos casos contaminadas con sustancias orgánicas y metales pesados altamente tóxicos, que afectan tanto al ecosistema como a la salud de los pobladores. Entre los metales pesados con mayor toxicidad se encuentra el plomo, el cadmio y el cromo cuyos límites máximos permisibles son: 0.05mg/L para plomo y cromo, 0.003mg/L para cadmio según legislación peruana⁹.

El carbón activado es el más utilizado en la industria; tradicionalmente se obtenía a partir del carbón mineral, el cual es un recurso no renovable; esto conduce, además a que incremente su costo. Los materiales lignocelulósicos son una fuente renovable, abundante y económica para la preparación de carbones activados⁹. Por su carácter adsorbente de los metales pesados en solución acuosa. El objetivo de este trabajo es demostrar la capacidad de adsorción de los iones cadmio a diferente temperatura y pH.

La producción de carbón activado y su empleo en problemas vinculados con la protección y el saneamiento ambiental se han visto notablemente incrementados en las últimas décadas. Los carbones activados presentan una considerable capacidad de adsorción de

diversos compuestos tanto en fase gaseosa como líquida, principalmente gracias a su estructura porosa altamente desarrollada que les confiere una superficie específica. Estos adsorbentes han demostrado resultar de utilidad en el tratamiento de efluentes en procesos industriales y han sido propuestos por la agencia de protección ambiental para alcanzar niveles sanitarios admisibles de distintos contaminantes presentes en el agua¹⁰.

1.5.2 Importancia de la Investigación

La importancia básica es el poder integrar de la manera más económica, los procesos y operaciones de tratamiento, pueda proveer sin interrupción el caudal de diseño y satisfacer los requerimientos de calidad de agua potable.

El carbón activado ha tenido una aceptación mundial como el mejor control de olores y colores con un costo relativamente bajo. El carbón activado es un carbón tratado especialmente, el cual tiene la propiedad de adsorción o atracción de sólidos, líquidos y gases finamente divididos.

Actualmente los carbones activados son aplicados para el tratamiento de agua potable, aguas residuales y en la retención de compuestos orgánicos, colorantes y particularmente en la remoción de metales pesados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

2.1.1 Internacionales

La investigación realizada por P. Rodríguez Estupiñan, L. Giraldo, J.C. Moreno Pijarán (2011). ADSORCIÓN SIMPLE Y COMPETITIVA DE NIQUEL Y CADMIO SOBRE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR: El efecto de variables como pH y la presencia de un ión competitivo. Para ello se determinaron las isotermas de adsorción a diferentes valores de pH. Los resultados muestran la capacidad de remoción del carbón activado fue siempre mayor para níquel. Las isotermas disminuyen en comparación a las obtenidas por adsorción simple de los iones¹¹.

La investigación realizada por E.E. Gutiérrez segura (2011); REMOCIÓN DE AZUL ÍNDIGO Y CADMIO EN SOLUCIONES ACUSOSAS EMPLEANDO UN MATERIAL ZEOLÍTICO MODIFICADO Y UN MATERIAL CARBONOSO ACTIVADO. Tiene como objetivo de evaluar la capacidad de remoción por adsorción. Metodología utilizada para la sorción - desorción. Se concluye que son adsorbentes con gran potencial para retener de manera simultánea tanto a la colorante azul mezclilla como el ión cadmio¹².

2.1.2 Nacionales

La investigación realizada por D.C. Obregón Valencia (2012); ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE CADMIO UTILIZANDO CARBONES ACTIVADOS; determinar las mejores condiciones de preparación del carbón activado, evaluación de la capacidad de adsorción mediante curvas cinéticas e isothermas de adsorción ².

La investigación realizada por G.A. Delgadillo Gamboa (2011); PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS Y SU APLICACIÓN COMO MATERIAL ADSORBENTE, tiene como objetivo estudiar las características y capacidad de adsorción; entre las variables de preparación de carbón activado ,la relación de impregnación en masa y la temperatura de activación tiene una influencia determinante en las propiedades texturales y adsorbentes⁸.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Adsorción

Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen. En química la adsorción de una sustancia es su acumulación en una determinada superficie. El resultado es la formación de una película líquida o gaseosa en la

superficie de un cuerpo sólido o líquido. En el interior del material, todos los enlaces químicos ya sean iónicos, químicos o metálicos de los átomos constituyentes están satisfechos. En cambio por definición, la superficie representa una discontinuidad de esos enlaces. Para esos enlaces incompletos, es enérgicamente favorable el reaccionar con lo que se encuentre disponible por ello se produce de forma espontánea. La naturaleza exacta del enlace depende de las particularidades de los especímenes implicados, pero el material adsorbido es generalmente clasificado como fisisorbido o quimisorbido. La cantidad de material que se acumula depende del equilibrio dinámico que se alcanza entre la tasa a la cual el material se adsorbe a la superficie y la tasa a la cual se evapora; a su vez estas normalmente dependen de forma importante de la temperatura. Cuando mayor sea la tasa de adsorción y menor de la desorción, mayor será la fracción de la superficie disponible que será cubierta por el material adsorbido en el equilibrio¹³.

En los sistemas de adsorción experimental demostrativo el soluto en una solución, se llama adsorbato (cuando no está en el estado adsorbida) cuando comienzan como una fase adsorbida dentro de un sólido, y el sólido se conoce como el adsorbente.

La adsorción en solución puede ser complicada debido a que el soluto puede cambiar químicamente, o su concentración puede cambiar en solución. A si la concentración de una molécula de ácido es una función del pH de la solución y se tiene que señalar que tanto la molécula no dissociada y un ión asociados pueden ser adsorbidos¹³.

La adsorción es un fenómeno de superficie que involucra la transferencia de masa del adsorbato a la superficie de un adsorbente. Este proceso ocurre en la región interfacial, en tres etapas consecutivas (Gráfico 1)²:

Primera etapa o difusión externa: el adsorbato se acerca a la superficie externa del sólido, venciendo la resistencia que se encuentra acumulada en una fina película límite alrededor del adsorbente. La superficie externa que expone el sólido es normalmente menor al 1% del total existente (superficie externa e interna).

Segunda etapa o difusión interna: el adsorbato migra a través de la red porosa del sólido.

Tercera etapa: el adsorbato se adhiere a la superficie del adsorbente presentándose la adsorción propiamente dicho.

El término de adsorción no fue utilizado hasta 1881 por Kayser para describir como los carbonizados atrapaban los gases. Aproximadamente por estas fechas R. Von Ostrejko, considerado el inventor del carbón activado, desarrolla varios métodos para producir carbón activado tal y como se conoce en nuestros días más allá de simples carbonizados de materiales orgánicos o del carbón vegetal. Así en 1901 patentó dos métodos diferentes para producir carbón activado. El primero consistía en la carbonización de materiales lignocelulósicos con cloruros de metales; lo cual resultó la base de lo que hoy en día es la activación química. En el segundo proponía una

gasificación suave de materiales previamente carbonizados con vapor de agua y CO_2 es decir una activación física o térmica.

2.2.1.1 Adsorción química

Es el resultado de la interacción química entre una molécula de adsorbato y la superficie del adsorbente. La fuerza con la que se unen se aproxima a la de un enlace químico, aunque a veces se puede dar solo la modificación o la deformación parcial de los orbitales moleculares. Por estas razones, se producen cambios en la estructura de las especies involucradas. Este tipo de adsorción es irreversible. Ocurre con frecuencia en procesos catalíticos y en casos específicos está implicado en proceso de separación^{8, 14}.

El tiempo y el calor de adsorción en una quimisorción son mayores que en una fisorción. En la quimisorción se forma una monocapa, lo cual ocurre debido a la especificidad del enlace entre el adsorbente y el adsorbato^{8, 14}.

2.2.1.2 Adsorción física

Es el resultado de la acción de fuerzas de Van Der Waals entre el adsorbato y el adsorbente. El proceso es reversible debido a la naturaleza de la unión bastante débil, la cual se puede romper por modificaciones en la temperatura, presión o concentración. Sobre la superficie del adsorbente se puede depositar varias capas de adsorbatos formando multicapas. El mecanismo

básico por el que un adsorbente puede retener un adsorbato depende del tamaño de la molécula a retener, la solubilidad y la concentración⁸.

2.2.1.3 Adsorción de especies iónicas

El intercambio iónico consiste en pasar una disolución acuosa con ión cadmio, en forma continua sobre un intercambiador con resina catiónica y otro intercambiador con resina aniónica, los cuales remplazarán los cationes y aniones por H^+ y OH^- , respectivamente. Este proceso tiene el riesgo de taponamiento por crecimiento bacteriano o por deposición de materia coloidal en los poros de la resina.

2.2.1.4 Modelos Cinéticos

Se utilizan los modelos de pseudo de primer y segundo orden, para poder analizar si el proceso de adsorción es controlado por un mecanismo de transferencia de masas o por las reacciones químicas que existe entre el adsorbente - adsorbato.

a) Modelo cinético de pseudo primer orden

Asume la fuerza impulsora del proceso de adsorción es la diferencia entre la concentración del adsorbato en el equilibrio (q_e) y el obtenido a un tiempo t (q_t). Su forma lineal se representa mediante la siguiente ecuación^{2,16}.

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \left(\frac{k_1}{2,303}\right)t$$

Donde:

q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) = es la capacidad de adsorción o concentración del adsorbato en el sólido en condición de equilibrio.

q_t ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) = es la capacidad de adsorción o concentración del adsorbato en el sólido a un tiempo t .

$K_1(\text{min}^{-1})$ = es la constante de velocidad del modelo de pseudo primer orden.

t (min)= es el tiempo empleado en el ensayo de adsorción.

b) Modelo cinético de pseudo segundo orden

Describe el proceso de adsorción considerando predominantemente una adsorción química. La forma lineal de este modelo se representa de la siguiente manera ^{2,16}.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t$$

Donde:

q_t ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) = capacidad de adsorción.

t (min) = el tiempo de adsorción.

q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) = es la capacidad de adsorción en el equilibrio.

K_2 ($\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) = es la constante de velocidad del modelo de pseudo segundo orden.

c) Modelo cinético de difusión intraparticular

Normalmente, la etapa limitante de la velocidad de adsorción se puede encontrar en la difusión externa o interna. Para determinar cuál de estas etapas es limitante se aplica el modelo difusión intraparticular. Este modelo se basa en la teoría propuesta por Weber y Morris, según la cual el mecanismo de adsorción depende tanto de las características físico químicas del adsorbente como del proceso de transporte de masa o difusión, el coeficiente de difusión intraparticular (K_{dif}) está dado por la siguiente

ecuación^{2,17}.

$$q_t = k_{\text{dif}} t^{0.5} + C$$

q_t = es la cantidad de cadmio de adsorbido por gramo de carbón activado en un tiempo t , expresado en ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

t = el tiempo de adsorción (min).

K_{dif} = es la constante del modelo de difusión intraparticular

($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-0.5}$).

La grafica q_t Vs. $t^{0.5}$ representa las diferentes etapas de adsorción. La curva inicial corresponde a la difusión externa (interfase sólido- líquido) y el siguiente tramo de la gráfica se asocia a la difusión interna o intraparticular. La pendiente de este segundo tramo corresponde al parámetro e difusión intraparticular, K_{dif} . Por otro lado, algunos investigadores asocian el valor de intercepto con el eje de las ordenadas, C, con el límite de la capa de transferencia de masa adsorbato – adsorbente ^{2,17}.

2.2.1.5 Isotermas de adsorción

Establece la relación entre la cantidad absorbida y la concentración o presión de equilibrio, la cual es una característica intrínseca de un sistema de adsorción adsorbente – adsorbato concreto, siendo los sistemas más comunes sólido – gas y sólido – líquido. Esta relación depende considerablemente de la temperatura del sistema, por ello se obtiene a temperatura constante. La adsorción en un sistema sólido- líquido, en general es un fenómeno más complejo que la adsorción en fase gas ⁸.

Isoterma de adsorción en un sistema sólido – fluido (gas o líquido) constituido por uno o varios solutos (adsorbato), un disolvente (agua) y un sólido (adsorbente), se utiliza la denominada isoterma de adsorción. La isoterma es una

expresión matemática que proporciona información de la cantidad de adsorbato que puede ser retenido sobre el adsorbente en el equilibrio y a una temperatura constante. La capacidad de adsorción se obtiene por la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m}$$

Donde:

q_e ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) = capacidad de adsorción en el equilibrio.

C_0 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) = es la concentración inicial del adsorbato.

C_e ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) = es la concentración del adsorbato en equilibrio.

V (L) = es el volumen de la solución.

m (g) = es la masa del adsorbente.

Isoterma de adsorción en un sistema sólido – gas; se obtiene graficando la cantidad del adsorbato que puede ser retenido sobre el adsorbente en el equilibrio versus la presión relativa p/p_0 del gas donde p , representa la presión del adsorbato gaseoso en el equilibrio y p_0 , indica la presión de saturación del adsorbato².

La IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) lo clasifica en seis tipos representados en el **gráfico2**; la isoterma tipo I, llamada isoterma de Langmuir, es característica en sólidos microporosos (adsorbentes con poros menores a 2nm).

De acuerdo con la forma de la curva (gráfico 2), se observa que a bajas presiones la cantidad adsorbida aumenta con la presión relativa debido a la alta interacción adsorbente- adsorbato, y alcanza la condición de equilibrio termodinámico indicando la formación de una monocapa de adsorción. La isoterma tipo II, es característica de la adsorción sobre sólidos no porosos o macroporosos, la cantidad adsorbida se incrementa en forma lineal con la presión relativa y aumenta rápidamente a presiones relativas cercanas a la unidad. La isoterma tipo III, es propia de los sistemas con una interacción muy débil de adsorbente-adsorbato, lo que hace necesario aumentar la presión relativa hasta un valor determinado para que la adsorción sea apreciable. La isoterma tipo IV, se presenta en materiales mesoporosos; el proceso de adsorción involucra la formación inicial de una monocapa y al aumentar la presión relativa se produce la formación de una multicapa. Esta isoterma presenta un ciclo de histéresis, lo que significa que la trayectoria seguida durante el proceso de adsorción en un determinado rango de presiones relativas no coincide con la trayectoria seguida durante el proceso de desorción, este ciclo se asocia al llenado y vaciado de mesoporos (2-50nm). La isoterma tipo V, es poco común se relaciona con la isoterma de tipo III en donde la interacción adsorbente- adsorbato es débil, pero se obtiene solo con adsorbentes porosos. La isoterma tipo VI, representa una

adsorción por multicapas sobre una superficie no porosa uniforme².

Isoterma de adsorción en un sistema sólido – líquido; según el modelo general propuesto por Giles et al. En el **gráfico 3** se presentan los cuatro principales tipos de isothermas, en estos casos se ha denominado Q a la capacidad de adsorción del adsorbato en equilibrio. La isoterma tipo C; tiene la forma de línea recta con origen en el valor cero del eje de concentración de equilibrio, esto quiere decir que la relación entre Q y la concentración del adsorbato remanente en la solución en equilibrio (C) permanece constante a cualquier concentración. La isoterma tipo L; se asemeja mucho a la isoterma de Langmuir e indica que la razón entre la concentración del adsorbato remanente en la solución y la cantidad adsorbida en el sólido disminuye al aumentar la concentración en el equilibrio de la solución originando una curva cóncava, este comportamiento sugiere una saturación progresiva del sólido; esto se subdivide en dos grupos: cuando la curva alcanza una meseta estrictamente asintótica (indica que el sólido tiene una limitada capacidad de adsorción) y cuando la curva no alcanza ninguna meseta (el sólido no presenta claramente el límite de su capacidad de adsorción). La isoterma tipo H; es un caso especial de la isoterma tipo L donde la pendiente inicial es muy alta, quiere decir que la curva está muy pegada al eje de las ordenadas. La isoterma tipo S; presenta una curva sigmoidea y

un punto de inflexión, donde las curvas son ligeramente convexas en la parte inicial de la adsorción, debido posiblemente a la resistencia al transporte de masa o difusión en la interfase^{2, 19,20}.

a) Isotherma de Langmuir

Langmuir fue el pionero en proponer una teoría coherente, desde un punto de vista cinético, para explicar la adsorción sobre una superficie plana. El modelo de Langmuir asume que todos los centros activos de la superficie del adsorbente son energícamente equivalentes la adsorción es localizada y definida, cada sitio de adsorción puede acomodar una molécula^{8, 21}.

La adsorción de una sustancia de una fase líquida o gaseosa sobre la superficie de un sólido involucra la distribución de esa sustancia entre las dos fases en equilibrio^{8, 22}.

El modelo de Langmuir asume que la adsorción ocurre en un número finito y definido de sitios localizados idénticos y equivalentes que forman una monocapa. Esto ocurre sin ninguna interacción lateral o impedimento estérico entre las moléculas adsorbidas. La isoterma de Langmuir describe una adsorción homogénea, en la cual cada molécula posee una entalpía y energía de activación constante (los sitios poseen la misma afinidad por el adsorbato), sin que ocurra ninguna trans migración del adsorbato en el plano de la superficie^{2, 23}.

La ecuación del modelo de Langmuir se expresa en forma linealizada se expresa mediante:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_{m\acute{a}x}} + \frac{C_e}{q_{m\acute{a}x}}$$

Donde:

$q_e(\text{mg.g}^{-1})$ = representa la capacidad de adsorción o cantidad del adsorbato retenido en el adsorbente en el equilibrio.

$C_e(\text{mg.L}^{-1})$ = es la concentración del adsorbato en la solución en el equilibrio.

$q_{m\acute{a}x}(\text{mg.g}^{-1})$ = es la capacidad máxima de adsorción.

$K_L(\text{L.mg}^{-1})$ = representa la constante de Langmuir relacionada con el calor de adsorción.

La teoría de Langmuir indica una disminución relativamente rápida de las fuerzas de atracción al aumentar la distancia entre el adsorbato y el adsorbente. Por esto se define una constante adimensional conocida como el factor de separación R_L , definido por Webber y Chakkravorti mediante la siguiente ecuación:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

Donde:

$K_L(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1})$ = es la constante de Langmuir.

$C_0(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ = es la concentración inicial del adsorbato.

R_L = indica si la naturaleza de una adsorción es favorable o desfavorable; como indica:

$R_L > 1$: desfavorable, $R_L = 1$: lineal, $0 < R_L < 1$: favorable

$R_L = 0$: irreversible.

b) Isoterma de Freundlich

Se obtiene una buena correlación para el sistema sólido – líquido, este modelo no ideal asume que la superficie del adsorbente es energicamente heterogénea, pues la energía está distribuida según la topografía de la superficie. Esto es, sitio de adsorción con la misma energía de interacción adsorbente – adsorbato agrupados en pequeñas áreas, las cuales son completamente independientes unas de otras^{8, 23}.

Se puede aplicar este modelo para una adsorción en multicapa sin una distribución uniforme de entalpía o afinidad de adsorción sobre una superficie heterogénea^{2, 23}. El modelo linealizado se representa por:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$$

Donde:

$q_e(\text{mg.L}^{-1})$ = capacidad de adsorción en el equilibrio.

$C_e (\text{mg.L}^{-1})$ = es la concentración del soluto presente en la solución en el equilibrio.

$K_F(\text{mg}^{1-1/n} \cdot \text{L}^{1/n} \cdot \text{g}^{-1})$ = parámetro de la capacidad de adsorción del material.

$1/n$ (adimensional) = representa una medida de la intensidad de la adsorción.

El tipo de isoterma depende del valor $1/n$, si dicho valor es mayor o igual a 0,5 la curva de la isoterma es cóncava hacia arriba y la adsorción es desfavorable del tipo III. Si $1/n$ es menor a 0,5 el tipo de isoterma es similar al tipo II siendo cóncava hacia arriba a altos valores de C/C_o a la adsorción es favorable.

c) Isoterma de Elovich

Este modelo describe la quimiosorción en carbón activado.

Se basa en el principio cinético que asume que los sitios de adsorción aumentan exponencialmente con esta, lo cual implica una adsorción en multicapa^{8, 24}. Este modelo se expresa por la relación:

$$\frac{q_t}{q_m} = K_E C_e \exp(-q_t \epsilon / q_m)$$

Donde:

K_E (L.mg⁻¹) = constante de equilibrio de Elovich relacionada a la extensión de la superficie cubierta y a la energía de activación para la quimisorción.

d) Isoterma de Temkim

El modelo Temkim se deduce de la isoterma de Langmuir, representa adecuadamente los datos de adsorción de sistemas en fase líquida que no siguen el modelo de Langmuir⁸.

El modelo de Temkim se basa en dos hipótesis: el primero asume que el calor de adsorción de todas las moléculas en la capa adsorbida disminuye linealmente debido a la repulsión entre el adsorbato y el adsorbente. El segundo considera que existe una distribución uniforme de las energías de adsorción del adsorbato sobre el adsorbente hasta alcanzar un máximo valor de energía de enlace^{2, 23}. Su forma lineal se representa con la siguiente ecuación:

$$q_e = \left(\frac{RT}{b}\right) \ln A + \left(\frac{RT}{b}\right) \ln C_e$$

Donde:

q_e (mg.L⁻¹) = capacidad de adsorción en el equilibrio.

C_e (mg.L^{-1}) = es la concentración del soluto presente en la solución en el equilibrio.

T (k) = temperatura absoluta.

R = es la constante universal de los gases cuyo valor es $8,314\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

B = es la constante que está relacionada con el calor de adsorción.

A = constante de enlace en el equilibrio correspondiente a la máxima energía de enlace.

e) Isoterma de Giles

Este modelo se aplica en sistemas sólido- líquido. La clasificación se divide en cuatro categorías con subdivisiones para cada tipo, esta clasificación se basa en la curvatura inicial de la isoterma en el origen (Gráfico 4): la tipo S es convexa y la tipo L es cóncava, lo que corresponde a los tipos III y I de la clasificación de isotermas de BET, respectivamente. La tipo H se caracteriza por una fuerte adsorción preferencial del adsorbato y tiene mayor pendiente para bajas concentraciones. Para estas concentraciones, la de tipo C presenta un comportamiento lineal^{8, 25}.

f) Isoterma BET

La teoría BET responde a sus autores, Brunauer, Emmett y Teller quienes desarrollaron las ideas de Langmuir para describir la adsorción multimolecular o en multicapas.

Se basa en la posibilidad de que la adsorción se realice en múltiples capas y en cada una se cumplen los mismos principios que declaraba Langmuir en su teoría. Para un sistema sólido- gas, la ecuación matemática de las isothermas relaciona el volumen adsorbido con la presión relativa en el equilibrio a temperatura constante:

$$V_{ad} = f(P)_T$$

En el **Gráfico 5**. Se muestra los seis tipos de isothermas clasificadas según IUPAC, por las diferentes curvaturas que presentan. Estas diferencias obedecen a los distintos calores de la adsorción de diversos adsorbatos sobre un adsorbente y se describen a continuación. Así las formas de las isothermas son sumamente dependientes de la naturaleza del adsorbente^{8, 26}.

g) Isoterma de Redlich-Peterson

Presenta las características de las isothermas de Langmuir y Freundlich empleando tres parámetros. El modelo tiene una

dependencia lineal entre la concentración del adsorbato en equilibrio y la función exponencial.

$$q_e = \frac{(A_{RP}C_e)}{1+B_{RP}C_e^G}$$

El modelo puede ser aplicado tanto para sistemas homogéneos como heterogéneas y para un amplio rango de concentraciones, la ecuación linealizada se representa por:

$$\ln \left(A_{RP} \frac{C_e}{q_e} - 1 \right) = G \ln(C_e) + \ln(B_{RP})$$

Donde:

$q_e(\text{mg.L}^{-1})$ = capacidad de adsorción en el equilibrio.

$C_e (\text{mg.L}^{-1})$ = es la concentración del soluto presente en la solución en el equilibrio.

A_{RP} , B_{RP} y G = son los parámetros de Redlich- Peterson.

El valor de G varía entre 0 y 1, determina el grado de heterogeneidad de la superficie siendo más homogéneo al acercarse al 1. De esta manera la constante G puede caracterizar una isoterma: si G es cercano a 1, la isoterma preferida sería la de Langmuir, mientras que, si G es cercano a 0, la isoterma se aproxima a la de Freundlich^{2, 23}.

2.2.2 Cadmio

El cadmio es un elemento natural de la corteza terrestre. Generalmente se encuentra como mineral combinado con otros elementos como el oxígeno (óxido de cadmio), cloro (cloruro de cadmio) o azufre (sulfato de cadmio, sulfuro de cadmio).

Todos los tipos de tierra y rocas, incluso el carbón y fertilizantes minerales, contienen algo de cadmio^{27, 28, 29,30}.

2.2.2.1 Fuentes, usos y características

La fuente más importante de liberación de cadmio al ambiente es el empleo de combustibles fósiles, como carbón y petróleo, aunque también puede ser liberado durante el refinado de zinc, plomo o cobre.

La minería de metales no ferrosos es fuente de liberación de cadmio al medio acuático. Puede provenir del agua de drenado de minas, de las aguas residuales del procesamiento de los minerales, del agua de lluvia que cae en el área general de las minas y de las partículas más ligeras de mineral, que pasan a través de los cedazos en las operaciones de concentración y purificación.

Su uso comercial es importante; es como cubierta electro depositada sobre hierro o acero para protegerlos contra la corrosión. La segunda aplicación es en baterías de níquel cadmio

y la tercera como reactivo químico y pigmento. Se recurre a cantidades apreciables en aleaciones de bajo punto de fusión semejantes a las del metal de Wood, en rociadoras automáticas contra el fuego y en cantidad menor, en aleaciones de latón, soldaduras y cojinetes. Los compuestos de cadmio se emplean como estabilizadores de plásticos y en la producción de cadmio fosforado.

Se caracteriza por ser usado principalmente como anticorrosivo. El sulfuro de cadmio es comúnmente usado como pigmento en plásticos, además sus compuestos son usados en baterías eléctricas, en componentes electrónicos y reactores

nucleares^{27, 28, 29, 30}.

2.2.2.2 Riesgos para la Salud

La exposición ocurre generalmente a través de dos vías: por ingestión de agua y alimentos que contengan el metal; y la segunda vía es la inhalación. La primera representa del 5 al 10% del total de cadmio absorbido en el organismo. Una vez absorbido, el cadmio es transportado por la sangre a los diversos órganos y tejidos, principalmente a riñones e hígado, en donde se detiene cerca del 50% del cadmio, y a glándulas salivales, páncreas, musculo y sistema nervioso central, en muy bajas concentraciones.

Pero cuando existe una exposición crónica del cadmio produce los siguientes efectos: en el riñón, puede ocasionar la formación

de cálculos renales, debilitamiento de los huesos o presentar irritaciones estomacales, náuseas, vómitos y diarrea, dolor abdominal y muscular, así como

Salivación^{27, 28, 29, 30, 33}.

Otros efectos sobre la salud:

- Fractura de huesos
- Fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad
- Daños al sistema nervioso central
- Daños al sistema inmune
- Desórdenes psicológicos
- Posibles daños en el ADN o desarrollo de cáncer

Recomendaciones médicas:

- concentraciones establecidas OMS: 0.003mg/L
- Determinación de cadmio en sangre: los niveles deben ser inferiores a 5ug/L de sangre total.
- Determinación de cadmio en orina: los niveles deben ser inferiores a 3ug/L de orina
- Determinar la beta-2 microglobulina en orina para detectar daño renal
- Pruebas de función hepática y renal
- Pruebas de función pulmonar

- Hemograma completo
- Radiografía de tórax: en casos de sobre exposición aguda.

2.2.2.3 Toxicidad

Los metales pesados son tóxicos para la flora acuática, los animales y los seres humanos incluso a concentraciones relativamente bajas. Entre ellos el cadmio como cd^{2+} es capaz de ser asimilado, almacenado y concentrado por el organismo. El cadmio es no biodegradable y viaja través de la cadena alimenticia. En humanos se ha reportado malestares como náuseas y vómitos a niveles de 15ppm de cd^{2+} . El riñón es el blanco crítico después de la ingesta, también puede causar diarreas, problemas pulmonares crónicos y deformación del esqueleto; tiene un tiempo de vida biológico medio de 10 a 35 años en humanos^{2, 31,32, 33}.

¿Qué ocurre con el cadmio cuando se libera en el medioambiente?

El cadmio entra a la tierra, al agua y al aire proveniente de las explotaciones mineras, las industrias y la combustión del carbón y desechos domésticos^{27, 28, 29,30, 33}.

- El cadmio no se degrada en el medioambiente, pero sí puede cambiar de forma.
- Las partículas de cadmio en el aire pueden viajar largas distancias antes de caer a la tierra o al agua.

- Algunas formas de cadmio se disuelven en el agua.
- El cadmio se adhiere fuertemente a partículas de tierra.
- Las plantas, los peces y otros animales absorben cadmio del medioambiente.

2.2.3 Carbón Activado

El carbón activado es predominantemente usado para el propósito de la adsorción, una tarea para la que está bien diseñado. En esencia, la adsorción se limita a trabajar en una de las dos fases gaseosa o líquida. Para la fase líquida deben tenerse en cuenta dos sistemas la acuosa y la no acuosa.

En términos generales de carbón activado se denomina a toda una gama de productos derivados de materiales carbonosos. Es un material que tiene un área superficial excepcionalmente alta.

El carbón activado es un material de carbón que se prepara en la industria para que tenga una elevada superficie interna y así adsorber una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución. Se trata de un material poroso que se obtiene por carbonización y activación de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, hullas, lignitos o turbas; con el fin de obtener un alto grado de porosidad y una importante superficie intraparticular. La elevada superficie específica facilita la adsorción física de gases y vapores de mezclas gaseosas o sustancias dispersas en líquidos.

La actividad del carbón activado en los procesos de adsorción viene dada fundamentalmente por la naturaleza de la materia prima y el proceso de activación utilizado en la producción del mismo. Su capacidad adsorbente se ve favorecida por la estructura porosa y la interacción con adsorbatos polares y no polares dada su estructura química, además de las reacciones químicas en su superficie están influenciadas por centros activos, dislocaciones y discontinuidades, donde los carbones tienen electrones desapareados y valencias insaturados presentando mayor energía potencial.

Basándonos en la difracción de rayos X, se puede describir dos tipos de estructuras porosas para el carbón activado:

- El primer tipo de estructura está formado por microcristalitas que en dos planos son semejantes al grafito constituido por capas paralelas de átomos de carbono ordenadas hexagonalmente.
- El segundo tipo de estructura se describe como un retículo tridimensional de hexágonos de carbono desordenados como resultado del ordenamiento al azar de las estructuras bencénicas condensadas que se forman durante la carbonización.

Entre los microcristales que constituyen el carbón existen huecos o espacios vacíos que se denominan poros. El área superficial total de estos poros, incluida la de sus paredes, es muy amplia siendo esta la principal razón de su capacidad de adsorción.

De acuerdo a la terminología de la IUPAC, los poros cuyo tamaño no excede de 2 nm son llamados microporos, que son donde ocurre el

fenómeno de adsorción en mayor medida, los que exceden de 50 nm son llamados macroporos, estos juegan un papel importante en el transporte del adsorbato a través de los mesoporos hasta los microporos, los mesoporos son de tamaño intermedio entre 2 nm y 50 nm. El volumen de los microporos es en general mayor de $0,2 \text{ cm}^3 / \text{g}$ pudiendo alcanzar elevados valor de área de superficie específica interna.

Se puede clasificar el carbón activo en granular y polvo, dependiendo del tamaño de grano del mismo (grano grueso y grano fino) **Gráfico 6.**

2.2.3.1 Estructura y propiedades químicas

El carbón activo es carbón prácticamente puro, al igual que lo es el diamante, el grafito, el negro de humo y los diversos carbones minerales o de leña. Todos ellos poseen la propiedad de adsorber, que consiste en un fenómeno fisicoquímico en el que un sólido llamado adsorbente atrapa en sus paredes a cierto tipo de moléculas, llamadas adsorbatos y que están contenidas en un líquido o gas.

La composición química del carbón activo es aproximadamente un 75-80% en carbono, 5–10% en cenizas, 60% en oxígeno y 0,5% en hidrógeno.

La superficie de los carbones puede encontrarse combinada en mayor o menor proporción con otros átomos distintos al carbono (heteroátomos), dando lugar a diferentes grupos superficiales **Gráfico 7**.

Todos los carbones presentan en principio un carácter hidrófobo, no obstante podemos disminuir este carácter hidrófobo adicionando grupos superficiales polares **Gráfico 8**.

La química superficial de un carbón activado en su naturaleza anfótera, lo cual significa que en la superficie del carbón coexisten grupos superficiales de carácter ácido y grupos superficiales de carácter básico. Dado que el modificar el pH de los efluentes contaminantes no siempre resulta sencillo es preferible optimizar la química superficial del carbón activado teniendo en cuenta los criterios anteriores para que la adsorción sea máxima **Gráfico 9**.

Las propiedades adsorbentes de un carbón activado no dependen únicamente de la superficie y la porosidad. En particular, las sustancias polares se retienen débilmente sobre la superficie (apolar) del carbón. En estos casos la fijación al carbono de "heteroátomos", principalmente oxígeno e hidrógeno, formando estructuras o grupos funcionales tipo ácido carboxílico, lactosas, carbonilo, etc., elevan la afinidad de las sustancias polares por la superficie del adsorbente y pueden imprimir un carácter ácido-base al carbón. Al final cuando la sustancia a eliminar tiene una polaridad

apreciable, bajo volumen molecular y está muy diluida en aire, la retención a temperatura ambiente por el carbón sólo es efectiva si se impregna con reactivo específicos o se aprovechan las propiedades catalíticas del carbón. De esta manera tras la adsorción se producen unas reacciones químicas que transforman los productos tóxicos en inertes que se desorben o quedan retenidos en la porosidad del carbón.

2.2.3.2 Formas y aplicaciones

La primera aplicación industrial el carbón activado fue 1794, en Inglaterra, utilizando como agente decolorante en la industria del azúcar, esta aplicación permaneció en secreto por 18 años hasta que en 1812 apareció la primera patente. En 1854 tiene lugar la primera aplicación a gran escala del carbón activado en fase gas, cuando el alcalde de Londres ordena instalar filtros de carbón vegetal en los sistemas de ventilación de las cloacas. En 1872 aparecen las primeras mascarar con filtros de carbón activado utilizadas en la industria química para evitar la inhalación de vapores de mercurio.

La primera guerra mundial y el uso de agentes químicos durante la contienda, trajo como consecuencia la necesidad urgente de desarrollar filtros de carbón activado para máscaras de gas. Ese acontecimiento fue el punto de partida para el desarrollo de la industria del carbón activado para el uso en la adsorción de

gases tóxicos y potabilización de agua, otras aplicaciones como depuración de agua y gases, medicas, soporte de catalizadores, eliminar sabor y olor de agua, eliminar o recuperar compuestos orgánicos como tintes y disolventes de las aguas o purificar el aire, en plantas potabilizadoras y como lechos de carbón activado para la depuración de agua de suministro urbano.

En la actualidad es ampliamente implementado en empleo de carbón activado en diversos campos de la industria tales como la industria azucarera, química, farmacéutica, procesos industriales, tratamiento de aguas residuales y potables; ya que el carbón activado es la sustancia adsorbente por excelencia. Esta elevada capacidad de adsorción de diversas sustancias, junto con la facilidad y rapidez de eliminación del medio tratado y la posibilidad de una vez agotado, ser regenerada para su reutilización, permite un tratamiento eficaz y barato en múltiples aplicaciones, en muchos de los casos en un producto insustituible.

2.2.3.3 Preparación de carbón activado

Para la elaboración de carbón activado se parte de materiales tales como las cortezas de almendros, nogales o palmeras, otras maderas y carbón mineral.

Este carbón se obtiene calentando el material de que se trate al rojo vivo para expulsar los hidrocarburos, pero sin aire suficiente para mantener la combustión. A continuación y con

el objeto de activar el carbón formado se expone este a un gas oxidante a altas temperaturas. Este gas desarrolla una estructura porosa en el carbón natural favoreciendo la aparición de superficies internas. Las propiedades superficiales que se obtienen como resultado dependen del material inicialmente empleado y del proceso exacto de elaboración, de modo que las variaciones posibles son muchas. El tipo de material base con el que se produce el carbón activado también puede afectar al tamaño de los poros y a las características de regeneración del carbón activado. Tras el proceso de activación, el carbón se puede separar o dividir en diferentes tamaños con diferentes capacidades de adsorción. Los dos tipos de clasificación son: carbón activado en polvo y granular.

El carbón activo granular se regenera fácilmente por oxidación de la materia orgánica y su posterior eliminación de la superficie del carbón en un horno. En este proceso se destruye parte del carbón, entre un 5 y un 10%, y es necesario reemplazarlo por carbón nuevo o virgen. Es conveniente aclarar que la capacidad de adsorción del carbón regenerado es ligeramente inferior a la del carbón virgen.

La **activación** propiamente dicha puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo a continuación de ésta. Consiste en hacer reaccionar al agente activante con los átomos de carbono del carbonizado que está

siendo activado; de forma que se produce un “quemado selectivo” que va horadado progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado. Los agentes activantes que se suelen usar son: Oxígeno (raramente a escala industrial), aire, vapor de agua (el más usado) y CO. Estos agentes dan lugar a las siguientes reacciones químicas donde se eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad **Gráfico 10**.

La activación química se basa en la deshidratación mediante sustancias químicas y a una temperatura media (400 – 600°C). Ésta depende de la sustancia química a utilizar para activar el carbón. Existen numerosos compuestos que pueden usarse como agentes activantes, sin embargo los más usados industrialmente son el cloruro de zinc ($ZnCl_2$); especialmente para la activación de residuos de madera sin embargo su uso se ha restringido mucho en la actualidad, debido a los problemas medioambientales, no obstante algunos países como China aún siguen usando este método para producir carbón activado. El ácido fosfórico ($H_3 PO_4$); prácticamente ha desplazado al $ZnCl_2$ y los precursores en este tipo de activación son en su mayoría, como en el caso de $ZnCl_2$, residuos forestales (madera, cáscara de coco, hueso de aceituna, etc.). Y el hidróxido de potasio (KOH); se desarrolló durante los años 70, para producir los denominados “carbones superactivados”, con superficies específicas del orden de los $3000m^2/g$. A diferencia de los otros

dos agentes activantes, los precursores preferibles para la activación con KOH son aquellos de bajo contenido en volátiles y alto contenido en carbono, como los carbones minerales de alto rango, carbonizados, coque de petróleo, etc.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de Investigación

Descriptiva – transversal - Observacional

Sera descriptiva tipo que describe los hechos del problema que son observados. Será transversal el cual es diseñado para medir la prevalencia de la exposición.

3.1.1 Método

Inductivo- deductivo

Será un proceso inductivo por la capacidad de remoción del carbón activado en disolución con cadmio.

Será un proceso deductivo que va de lo particular o específico hacia lo más general; porque se va observar la capacidad de adsorción del carbón activado para con el ion cadmio.

3.1.2 Técnica

Observacional

El investigador se limita a la observación de los resultados para concluir.

3.1.3 Diseño

No experimental

Porque la presente investigación lleva su proceso sin intervención sobre las variables independientes.

3.2 Población y muestreo de la Investigación

3.2.1 Población

Está constituida por el agua y sus contaminantes.

3.2.2 Muestra

Está conformado por el ion cadmio presente en la disolución acuosa.

3.3 Variables e Indicadores

Variable Independiente (Y)

VARIABLE	INDICADORES
Ion cadmio	Concentración (ppm)
	Valores Máximo Permisibles (0.003 mg/L)

Variable Dependiente (X)

VARIABLE	INDICADORES
Carbón activado	Capacidad de Adsorción
	Tiempo de equilibrio

3.4 Técnica e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1 Técnicas

La técnica medición cuantitativa mediante ensayos de análisis de adsorción atómica es observable en una tabla de resultados.

3.4.2 Instrumentos

El instrumento es la hoja de registro de datos, ficha de resultados y el esquema gráfico emitida por la base de datos de la computadora.

CAPITULO IV

PRESENTACION, ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS

4.1 Materiales, equipos y métodos

- Estandar de cadmio 1000 ug/mL
- Agua ultrapura
- Matraz Erlenmeyer 500 mL
- Agitador magnético
- Magnetos
- Beakers 250 mL
- Pipetas
- Fiolas 50, 100 mL
- Equipo de absorción atómica con horno de grafito

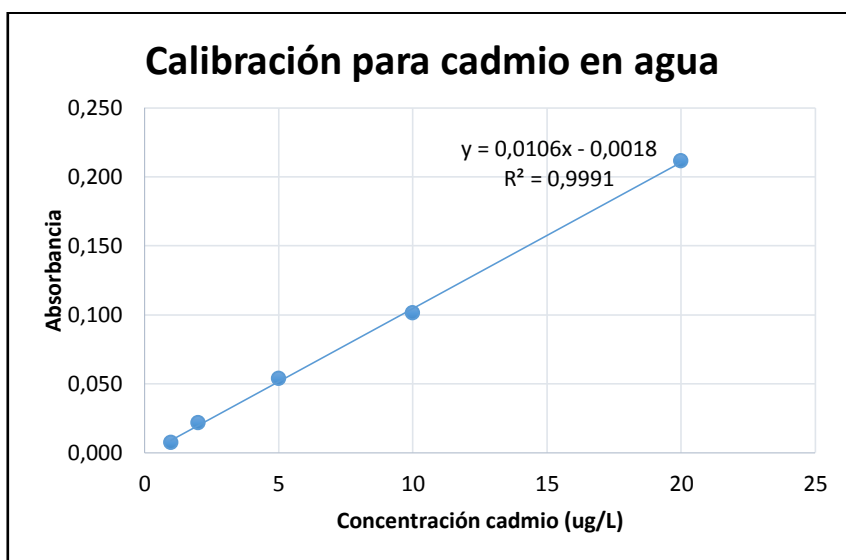
El carbón activado empleado para el presenta trabajo se ha empleado una muestra de carbón activado granulado, proveniente de cáscaras de coco, de una planta de producción ubicada en el departamento de San Martín - Perú.

La importancia de una curva de calibración para llevar a cabo un análisis en un equipo se tiene que calibrar, de tal forma se obtiene la curva de calibración con cadmio en agua obtenida en el equipo de absorción atómica con horno de grafito Perkin Elmer modelo Analyst 800.

Datos:

Cd (ug/L)	Absorbancia
1	0.007
2	0.0212
5	0.0535
10	0.1009
20	0.2114

Gráfico de la curva de calibración:



Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

4.1.1 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

1. Cinética; se empleó los modelos matemáticos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden.
2. Determinación de metales en agua; se empleó modelo de regresión lineal, se obtuvo la ecuación de la recta y con esta ecuación se determinó la concentración de las muestras, para ello se empleó el principio de Lambert y Beer (la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de la muestra).
3. Parámetros de pH y temperatura de manera análoga se empleó gráfico de barra y de dispersión.

4.2 CINÉTICA DE LA ADSORCIÓN DE CADMIO SOBRE CARBÓN ACTIVADO

Con el fin de determinar el tiempo de equilibrio de la adsorción de cadmio sobre carbón activado, se colocó 0,10 g del carbón activado en un matraz y se puso en contacto con 300 mL de una solución de cadmio de 5000 ug/L, se separaron alícuotas 500 uL cada cierto tiempo para ser analizadas, se consideró que el sistema alcanzó el equilibrio cuando las alícuotas no tuvieron cambios significativos en sus concentraciones.

4.2.1 DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE CADMIO EN SOLUCIÓN

Para determinar las concentraciones de cadmio en las soluciones, se empleó la técnica de absorción atómica con horno de grafito, se empleó un equipo Perkin Elmer modelo Analyst 800, para ello la muestra se introdujo al horno de grafito y se le adicionó nitrato de magnesio como modificador de matriz, se realizó previamente una curva de calibración con un patrón de cadmio.

4.3 EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ADSORCIÓN

4.3.1 CINÉTICA DE LA ADSORCIÓN

Los resultados experimentales de la cinética se aprecian en la **tabla 1**, se realizaron análisis de alícuotas tomadas desde el tiempo cero hasta un tiempo de 48 horas, para determinar el tiempo en el que el sistema llega al equilibrio; los datos recolectados son graficados (**Figura 1**), se grafica el tiempo transcurrido Vs. La capacidad de adsorción en el tiempo “t” q_t (Ecuación 1). Se observa que el equilibrio se alcanza antes de las 02 horas, cuando la concentración de cadmio en la solución no disminuye significativamente.

$$q_t = V (C_i - C_t) / m \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

q_t = Capacidad de adsorción del carbón activado (mg/g)

V = Volumen de solución empleada para el ensayo (mL)

C_i = Concentración inicial en la solución (mg/L)

C_t = Concentración de cadmio en la solución en un tiempo "t" (mg/L)

m = masa de carbón activado empleado para el ensayo (g)

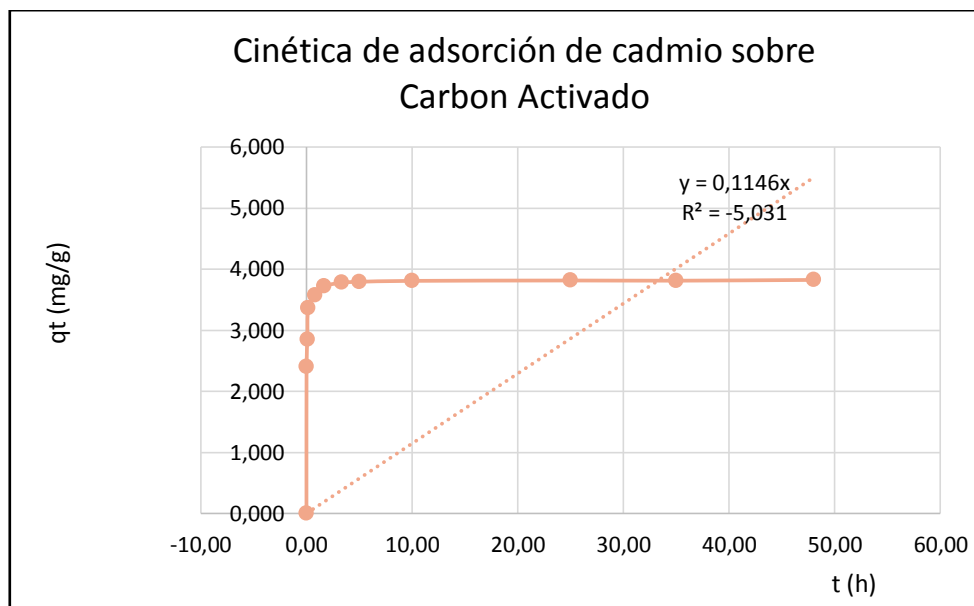
Tabla 1. Cinética de la adsorción de cadmio sobre carbón activado.

Nº	t(min)	t(h)	cadmio (ug/L)	qt (mg/g)
1	0	0.00	5000	0.000
2	0.5	0.01	4200	2.400
3	5	0.08	4052	2.844
4	10	0.17	3880	3.360
5	50	0.83	3810	3.570
6	100	1.67	3760	3.720
7	200	3.33	3740	3.780
8	300	5.00	3735	3.795
9	600	10.00	3730	3.810
10	1500	25.00	3728	3.816
11	2100	35.00	3729	3.813
12	2880	48.00	3725	3.825

Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

La cinética de adsorción es la forma de una demostración de la actividad de un adsorbente frente a un adsorbato; para un tiempo transcurrido de 10 minutos, tenemos que el carbón activado tiene la capacidad de adsorción de 3.360mg quedando en disolución 3.88mg; donde se parte desde un tiempo cero con 5mg de ion cadmio en disolución que es la concentración inicial.

Figura 1. Curva cinética de adsorción de cadmio con carbón activado.



Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

La curva cinética de adsorción de cadmio con carbón activado se representa en una gráfica como se observa en la figura 1; la cinética determina de la capacidad de adsorción, que alcanza una meseta a concentraciones altas en un tiempo determinado, lo que indica que el carbón activado tiene limitada capacidad de adsorción, dado que al saturarse la superficie llega a un

equilibrio; para la isoterma de adsorción establecida por Giles para un sistema sólido- líquido la curva se asemeja a la de tipo L.

4.3.2 DETERMINAR EL ORDEN DE LAS CINÉTICAS DE REACCIÓN

Con los resultados obtenidos se probaron dos modelos matemáticos para evaluar el tipo de cinética que siguen estos sistemas, el modelo de cinética de pseudo- primer orden y el de pseudo- segundo orden.

a. Modelo de cinética pseudo-primer orden

El modelo de pseudo-primer orden, describe las adsorciones que son del tipo fisisorción, es decir atracciones electrostáticas, descrito por Langergren y Svenska³⁷; se define como:

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

Donde:

q_e : Concentración en el equilibrio del adsorbato en solución, “mg/g”.

q_t : Concentración del adsorbato en un tiempo t , “mg/g”

t : Tiempo transcurrido, “h”

K : Constante de velocidad de reacción, “1/h”

Para obtener la forma linealizada se grafica $\ln(q_e - q_t)$ versus t , cuyos resultados se muestran en la tabla 2 y cuyo gráfico se muestra en la

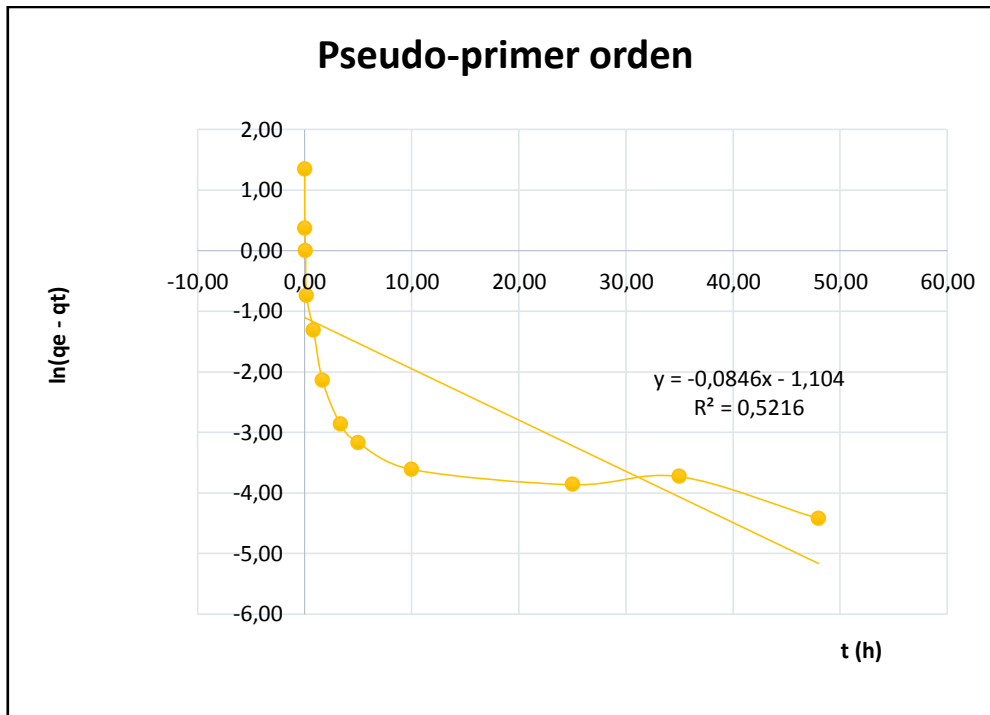
figura 2, se ha obtenido los parámetros q_e teórico y R^2 , los cuales se muestran en la tabla 4.

Tabla 2. Datos obtenidos al aplicar el modelo de pseudo- primer orden.

T (h)	$\ln(q_e - q_t)$
0.00	1.345
0.01	0.363
0.08	-0.007
0.17	-0.740
0.83	-1.321
1.67	-2.146
3.33	-2.865
5.00	-3.170
10.00	-3.612
25.00	-3.863
35.00	-3.730
48.00	-4.423

Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

Figura 2. Gráfica de la cinética de pseudo-primer orden, forma lineal.



Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

En la correlación de resultados experimentales con los modelos cinéticos; los valores calculados de q_e por el modelo de pseudo primer orden se alejan del valor q_e experimental; donde q_e experimental 3.825 mg/g, q_e , teórico 0.332 mg/g y R^2 0.5216.

b. Modelo de cinética pseudo - segundo orden

El modelo de pseudo-segundo orden representa la quimisorción debido a la formación de enlaces químicos, entre el adsorbato y el adsorbente en la monocapa de la superficie, la ecuación se define como:

$$t/q_t = 1/k_2 q_e^2 + t /q_e$$

Donde:

q_e : Concentración en solución en el equilibrio del adsorbato, “mg/g”.

q_t : Concentración del adsorbato en un tiempo t , “mg/g”

t : Tiempo transcurrido, “h”

k_2 : Constante de velocidad de reacción, “1/h”

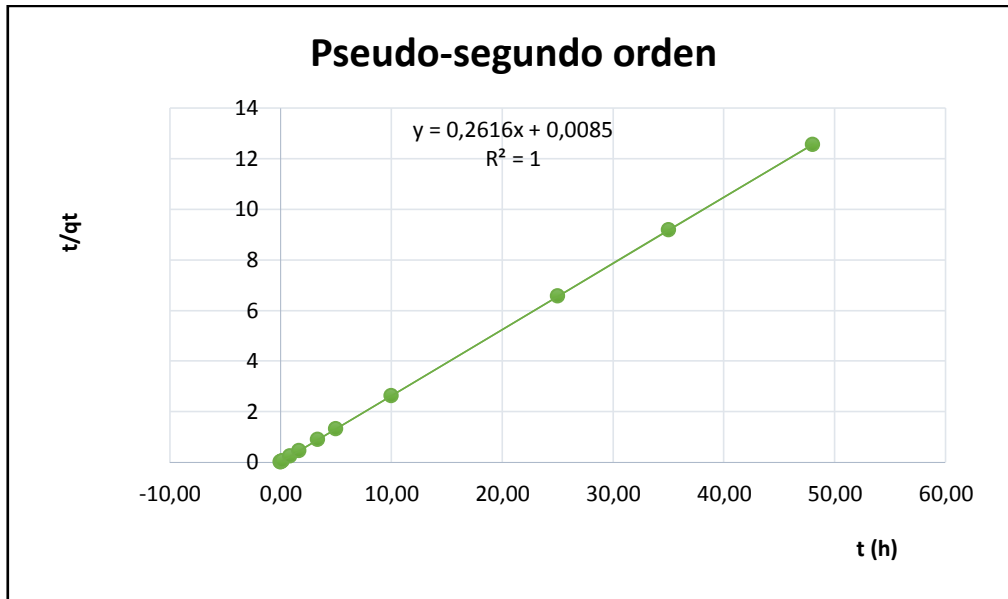
Para obtener la forma linealizada se grafica t/q_t versus t cuyos datos se muestran en la tabla 3, y cuya grafica se muestra en la **figura 3**, se ha obtenido los parámetros q_e calculado y R^2 , los cuales se muestran en la **tabla 4**. Se observa que hay una buena correlación con los valores experimentales, lo cual indica que la cinética de adsorción del material preparado sigue este modelo, lo cual está de acuerdo con el hecho que las especies de cadmio formen enlaces químicos con los grupos funcionales de la superficie del carbón activado.

Tabla 3. Datos obtenidos al aplicar el modelo de pseudo-segundo orden.

t	t/qt
0.00	-10
0.01	0.00
0.08	0.03
0.17	0.05
0.83	0.23
1.67	0.45
3.33	0.88
5.00	1.32
10.00	2.62
25.00	6.55
35.00	9.18
48.00	12.55

Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

Figura 3. Gráfica de la cinética de pseudo-segundo orden forma lineal.



Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

En la correlación de resultados experimentales con los modelos cinéticos; los valores calculados de q_e en el caso del modelo de pseudo segundo orden tiene un mejor ajuste con los valores q_e experimental ya que el valor de coeficiente de correlación se acerca a la unidad; q_e experimental 3.825mg/g, q_e teórico 3.823mg/g y $R^2 = 1.0000$. Gráficamente será representada, por el modelo de pseudo segundo orden con una excelente forma lineal.

Figura 4. Evaluación de la cinética de la adsorción de cadmio sobre carbón activado modificado

Modelo cinético	Parámetros para cinética de adsorción		
	q_e , experimental (mg/g)	q_e , teórico (mg/g)	R^2
Pseudo-primer orden	3.825	0.332	0.5216
Pseudo-segundo orden	3.825	3.823	1.0000

4.3.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA ADSORCIÓN

Para observar cómo influye la temperatura en la capacidad de adsorción del cadmio sobre el carbón activado, se realizaron una serie de ensayos, manteniendo constante los demás parámetros, como concentración de la solución inicial, cantidad de material adsorbente, y tiempo de mezclado, se trabajó a tres temperaturas; 20, 25 y 30 °C; se dejó transcurrir un lapso de 02 horas para cada ensayo. Se usó 0.1 g de carbón activado y un volumen de 300 mL de solución de cadmio.

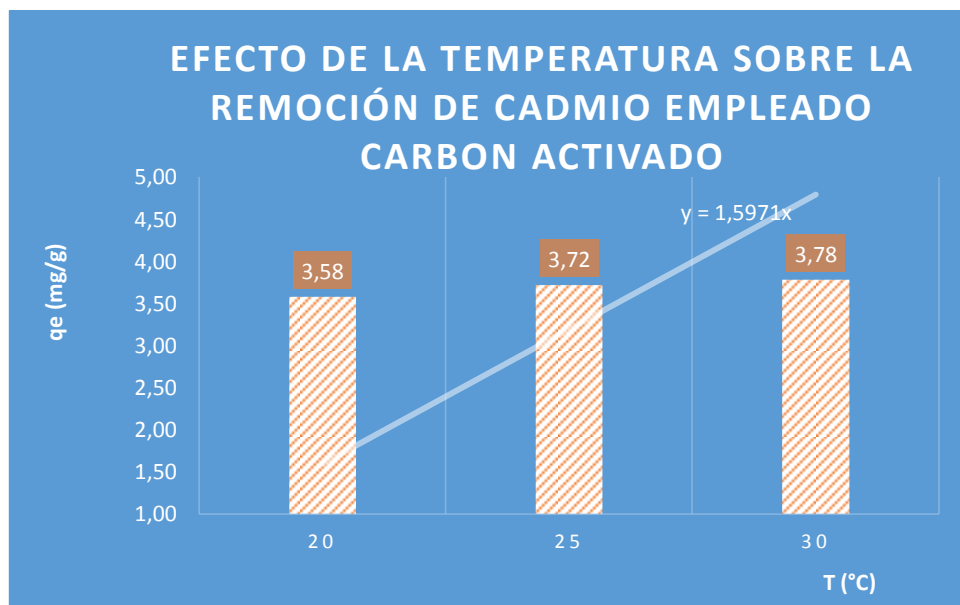
Para determinar cómo afecta la temperatura en la adsorción de cadmio sobre carbón activado, se realizó la adsorción a tres temperaturas diferentes, los resultados se observan a las dos horas, se muestra en la tabla 2, se observa que no hay diferencia significativa en las tres temperaturas probadas, sin embargo se observa que la mayor adsorción se da a 30 °C, tal vez por una mayor generación de sitios activos en los cuales se retiene los átomos de cadmio.

Tabla 5. Efecto de la temperatura en la capacidad de adsorción de cadmio con carbón activado

T (°C)	q _e (mg/g)
20	3.58
25	3.72
30	3.78

Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

Figura 5. Efecto de la temperatura sobre la eficiencia de adsorción.



Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

La capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado a diferente temperatura; se da por una mayor generación de sitios activos en los cuales se retiene los átomos de cadmio el cual confirma, que a

mayor temperatura será mayor la adsorción; en un tiempo de 02 horas, a 20; 25; 30°C. q_e (mg/g) 3.58; 3.72;3.78, respectivamente.

Para determinar la capacidad de adsorción se utiliza la siguiente ecuación;

$$q_e = V (C_i - C_e) / m$$

Donde:

q_e = Capacidad de adsorción del carbón activado (mg/g)

V = Volumen de solución empleada para el ensayo (mL)

C_i = Concentración inicial en la solución (mg/L)

C_e = Concentración de cadmio en la solución en el equilibrio (mg/L)

m = masa de carbón activado empleado para el ensayo (g)

4.3.4 EFECTO DEL pH SOBRE LA ADSORCIÓN

La influencia del pH en el proceso de adsorción es determinante; los compuestos ácidos se eliminan más fácilmente a pH bajos. Para evaluar como varía el proceso de adsorción con el pH de la solución, se puso en agitación 0,1g del material en estudio con 300 mL de una solución de 5000 $\mu\text{g/L}$ de cadmio a un rango de pH de 4.0 a 10.0, el pH se ajustó agregando gotas de soluciones de HNO_3 0.1N y NaOH

0.1N; finalmente se analizó la cantidad de cadmio residual en la solución.

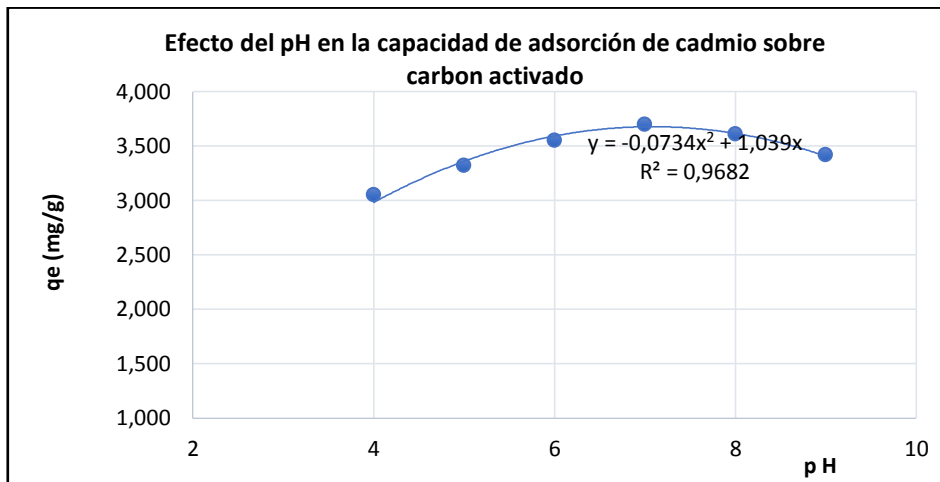
A pH bajos se presenta un efecto competitivo en la solución entre los iones H^+ y los iones metálicos, lo cual contribuye a una reducción de la capacidad de adsorción de los metales, Por el contrario, a pH 5, la superficie del CA se encontraría cargada en forma negativa lo cual favorecería las atracciones electrostáticas con los iones metálicos como el cadmio³⁸.

Tabla 6. Efecto **pH** en la capacidad de adsorción de cadmio sobre carbón activado.

pH	q _e (mg/g)
4	3.050
5	3.320
6	3.550
7	3.700
8	3.610
9	3.420

Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

Figura 6. Efecto **pH** en la capacidad de adsorción de cadmio sobre carbón activado.



Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud.

La capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado a diferente pH; el carbón activado tiene una reacción anfótera, pero a pH cercano al neutro su actividad de adsorción es óptimo llegando a su máxima capacidad. Se detalla con los resultados obtenidos que a pH 4 su q_e es 3.050mg/g, pH 7 su q_e es 3.700mg/g y pH 9 q_e es 3.420 mg/g.

DISCUSIÓN

Según la investigación realizada por D.C. Obregón Valencia (2012); ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE CADMIO UTILIZANDO CARBONES ACTIVADOS; determina de la capacidad de adsorción, que alcanza una meseta a concentraciones altas, lo que indica que el sólido tiene limitada capacidad de adsorción, la curva se asemeja a la de tipo L. en la correlación de resultados experimentales con los modelos cinéticos²; los valores calculados de q_e por el modelo de pseudo primer orden se alejan del valor q_e experimental; AGo,75-600 $k_1(\text{min}^{-1})$ 0.049, q_e (mg/g) 5.223, r^2 0.739. en el caso del modelo de pseudo segundo orden tiene un mejor ajuste ya que el valor de coeficiente de correlación se acerca a la unidad; AGo,75-600 q_e (mg/g) 8.38, k_2 ($\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 0.0031, r^2 1.00. Se muestra en el gráfico 18. Ante el efecto de la temperatura; el tiempo de contacto necesario para alcanzar el equilibrio fue de aproximadamente de 50 minutos. A medida que se incrementó la temperatura de activación de 400 a 600°C, la capacidad de adsorción fue mayor². Los valores de equilibrio (q_e) fueron 0.60; 2.92; 7.28 mg/g. se muestra en el gráfico 20. Ante el efecto del pH en una solución entre pH 2 y pH 5, se observa un aumento en su capacidad de adsorción²; a un pH 5, el q_e resulta 8.14 a 12.32mg/g. se muestra en el gráfico 21.

Según la investigación realizada por G.A. Delgadillo Gamboa (2011); PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS Y SU APLICACIÓN COMO MATERIAL ADSORBENTE, determina que en los mejores CA NF 0,94-500, los datos experimentales del proceso de adsorción tienen una mejor correspondencia con el modelo de Langmuir, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,993$; los valores de calculados (58,2mgfenol g-1CA) y experimentales (58,8mg/g CA. Entonces el proceso de adsorción ocurre en centros homogéneos sin

interacciones laterales, característico de una quimisorción⁸. En pseudo de primer orden $K_{ad}(h^{-1})$ 0.746, q_e experimental 58.2mmg/g, q_e teórico 22.94mmg/g, r^2 0.873; el pseudo según orden K_2 0.289mg/g.h, q_e experimental 58.2mg/g, q_e teórico 58.8mg/g, r^2 1.00. se muestra en el gráfico 19.

Según el trabajo realizado en determinación de ADSORCIÓN DE CADMIO CON CARBÓN ACTIVADO se determina las mismas cualidades descriptivas, en los resultados experimentales tenemos que T (min) 100, ión cadmio (ug/L) 3760, q_t (mg/g) 3.720 con C_i 5000 ug/L a T (min) 0. En los modelos cinéticos de pseudo de primer orden q_e experimental (mg/g) 3.825, q_e teórico (mg/g) 0.332, r^2 0.5216 y En los modelos cinéticos de pseudo de segundo orden q_e experimental (mg/g) 3.825, q_e teórico (mg/g) 3.823, r^2 1.000. En el cual se existe concordancia con nuestro antecedente. Se muestra en la figura 2 y 3. Ante el efecto de la temperatura se observa que no hay diferencia significativa en las tres temperaturas probadas en un tiempo de 60 minutos, a 20; 25; 30°C. q_e (mg/g) 3.58; 3.72; 3.78, se muestra en la figura 5; en el cual Si existe concordancia con nuestro antecedente. Ante el efecto de pH se observa un aumento en la capacidad de adsorción a mayor pH, tal como se muestra a pH 4; 5; 6; 7; 8; 9 con un q_e de 3.050; 3.320; 3.550; 3.700; 3.610; 3.420mg/g. se muestra en la figura 6; en el cual si existe concordancia con nuestro antecedente.

La investigación realizada por E.E. Gutiérrez segura (2011); REMOCIÓN DE AZUL ÍNDIGO Y CADMIO EN SOLUCIONES ACUSOSAS EMPLEANDO UN MATERIAL ZEOLÍTICO MODIFICADO Y UN MATERIAL CARBONOSO ACTIVADO. Tiene como objetivo de evaluar la capacidad de remoción por adsorción. Metodología utilizada para la sorción - desorción. Se concluye que son adsorbentes con gran potencial para retener de manera simultánea tanto a la colorante azul mezclilla

como el ión cadmio¹². Como fue demostrado por la técnica de BET, microscopía electrónica de barrido, análisis EDS, difracción de rayos X y espectrofotometría infrarroja. La capacidad de sorción más alta (2.37 mg/g); se muestra en el gráfico 23 y 24. Mientras que la sorción por medio de material carbonoso es $q_{max} 92.83 \text{ mmg/g}$ similar en el intervalo de pH inicial de 2 a 10.

Según el trabajo realizado en determinación de ADSORCIÓN DE CADMIO CON CARBÓN ACTIVADO se tiene que abordar en otros estudios para evaluar la capacidad de remoción por adsorción y determinar la sorción - desorción.

CONCLUSIONES

- Se determina la capacidad de adsorción del ión cadmio en una disolución acuosa con carbón activado granular de cascara de coco. Se observa que el equilibrio se alcanza antes de las dos horas, cuando la concentración del ión cadmio disminuye significativamente; donde la capacidad de adsorción es de 3.720mg/g en un tiempo de 100 minutos. El modelo cinético de pseudo-primer orden; donde q_e experimental 3.825mg/g, q_e teórico 0.332mg/g y su R^2 0.5216; el modelo cinético de Pseudo-segundo orden con q_e experimental 3.825mg/g, q_e teórico 3.823mg/g y R^2 1.00; representada, gráficamente por el modelo de pseudo segundo orden con una excelente forma lineal.
- La capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado a diferente temperatura; se da por una mayor generación de sitios activos en los cuales se retiene los átomos de cadmio el cual confirma, que a mayor temperatura será mayor la adsorción; en un tiempo de 60 minutos, a 20; 25; 30°C. q_e (mg/g) 3.58; 3.72;3.78, respectivamente.
- La capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado a diferente pH; el carbón activado tiene una reacción anfótera, pero a pH cercano al neutro su actividad de adsorción es óptimo llegando a su máxima capacidad. Se detalla con los resultados obtenidos que a pH 4 su q_e es 3.050mg/g, pH 7 su q_e es 3.700mg/g y pH 9 q_e es 3.420 mg/g.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar estudios de la capacidad de adsorción con diferentes tipos de carbón activado, provenientes de insumos o residuos generados en la agricultura peruana y realizar estudios con muestras de agua proveniente de lugares donde se presente este tipo de problemas y ver cómo afecta la eficiencia de remoción por los demás componentes químicos propios de la fuente de agua.

Se recomienda determinar la capacidad de adsorción a temperaturas extremas a bajas y elevadas temperaturas. El tiempo de exposición sea mayor y también a diferente pH extremos a lo experimentado; resultados obtenidos que a pH 4 su q_e es 3.050mg/g, pH 7 su q_e es 3.700mg/g y pH 9 q_e es 3.420 mg/g.

Se recomienda brindar facilidades a los investigadores con financiamiento, con el objetivo de investigar otros usos de las propiedades adsorbentes del carbón activado y realizar estudios de microscopía electrónica a la superficie de la muestra de carbón activado saturada para evaluar cómo se saturan los sitios activos y la distribución de los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

1. M.C. Basso, E.G. Cerrella, A.L. Cukierman. Remoción de cadmio de soluciones acuosas mediante carbón activado preparado a partir de caña. Buenos Aires. Argentina.
2. D.C. Obregón Valencia. Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de cadmio utilizando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje y aceitunas. Lima. Perú. 2012.
3. P.E. Pérez García y M.I. Azcona Cruz. Los efectos del cadmio en la salud. Rev.Esp.Mèd.Quir.vol.17, Num.3.Mexico. 2012.
4. Ideas de negocios: propuestas de usar semillas de palmeras nativas de la amazonia en alianza con las comunidades para hacer carbón activado útil en la minería. El comercio. 13, 2010.
5. Agency for toxic substances and Disease Registry, ATSDR: the Priority List of Hazardous Substances That Will Be the Subject of Toxicological Profiles.<http://www.atsdr.cdc.gov/SPL/index.html>.
6. Ministerio de ambiente decreto supremo N°002-2008-MINAM. Estandares Nacionales de Calidad Ambiental para el Agua. Categoría 1: poblacional y recreacional. Lima: El Peruano, 2008.
7. Fu, F. and Chang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. Journal of Environmental Management, 92, 407-418.
8. G.A. Delgadillo Gamboa. Preparación y caracterización de carbones activados y su aplicación como material adsorbente. Lima. Perú 2011.
9. Revista de la Sociedad Química del Perú. Volumen 80 N°4. Lima. Perú 2014.

10. M.C. Basso, E.G. Cerella, A.L. Cukierman. Remoción de cadmio de soluciones acuosas mediante carbón activado. Buenos Aires. Argentina 2008
11. P. Rodríguez estupiñan, L. Giraldo, J.C. Moreno Pijarán. Adsorción simple y competitiva de níquel y cadmio sobre carbón activado granular: efecto PH. Bogotá. Colombia 2011.
12. E.E. Gutiérrez Segura. Remoción de azul índigo y cadmio en Soluciones acuosas empleando un material zeolítico modificado y un material carbonoso activado. Toluca. México 2011.
13. E. J. Mendoza Colina. Remoción de Pb de soluciones mediante carbón activado. Bogotá. Colombia. 2012.
14. Moreno J.C. Fundamentos de Adsorción. PublicacionesCYTEC. Libro Taller V (p. 13-37). 2001
<http://www.ua.es/grupo/lma/web%20cytec/publicaciones/cytec20%libro tallerV/III.2%20Rodriguez%20reynoso.pdf>
15. Folleto informativo Norit. <http://www.norit.com/carbon-academy/what-is-adsorption/>. Fecha de consulta: diciembre 2015.
16. Y.S. Ho and G.Mackay. pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, 451-465. 1999.
17. Kalavathy H. kathikeyan T. Rajgopal S. and Miranda L. Kinetic and isotherm studies of Cu^{+2} adsorption onto H_3PO_4 activated rubber Wood sawdust. Journal of Colloid and Interface Science, 354-362. 2005.
18. Sing, K. 1985. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Chemistry, pure&applied, 57, 603- 619.

19. Giles, C.; Smith, D. and Huitson, A. 1974. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I. Theoretical. Journal of Colloid and Interface science, 47, 755-765.
20. Limousin, G. 2007. Review of adsorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. Applied Geochemistry, 22, 249-275.
21. Langmuir, I. 1916. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. J. Chem. Soc. 38(11), 2221- 2295.
22. Dise el proceso de purificación de estireno mediante adsorción. <http://www.tdr.cesca.es/>.
23. Foo, K. and Hameed, B. Review: Insight into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal, 156, (2-10). 2010.
24. Hamdaoui, O. and Naffrechoux, E. Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorophenols onto granular activated carbon part I. two-parameter models and equations allowing determination of thermodynamic parameters. Journal of Hazardous Materials, 147, 401-411. 2007.
25. Giles, C.H. and Smith, D. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm: I. Theoretical. Journal of Colloid and Interface Science, 47(3), 755-765. 1974.
26. Sing K.W.; Everett D.H.; Haul R.A.; Moscou, L.; Pierotti, R.A.; Rouquerol, J. and Siemieniowska, T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure Appl. Chem, 57(4), 603-619. 1985.
27. Ficha técnica. Hoja informativa de sustancias peligrosas. EE.UU. (2007).

28. Revista de la Sociedad Química del Perú. revista trimestral volumen 80.octubre –diciembre.2014.
29. DIGESA.GESTA AGUA. Parámetros para evaluar compuesto inorgánico. Lima -Perú.
30. Agency for toxic substances and Disease Registry. Division of toxicology and health Human Sciences.2008
31. Zuane, J. Handbook of Drinking Water Quality tandards and Controles. New York- U.S.A. Van NostrandReinhold, 64-69.1990.
32. World Health Organization, WHO. World Health Organization. Cadmium in drinking-water. <http://www.who.int/wátersanitation/health/dwg/chemicals/cadmium.pdf> fecha de consulta 2015.
33. Pérez García, Perla Esmeralda; Azcona Cruz, María Isabel. Los efectos del cadmio en la salud. Revista de Especialidades Médico- Quirúrgico vol.17, núm. 3, julio- septiembre, pp. 199-205. Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado.Mexico.2012.
34. U. Sevilla. E.U. Politécnica. Manual del Carbón Activo.Master en Ingeniería del Agua. www.aguapedia.net. España. Consultado en 11/15.
35. Ambiente, Ministerio del. Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM. (2008).
36. Estándares Nacionales de Calidad de Ambiental para Agua. Categoría1: Poblacional y recreacional. Lima: El Peruano, 2008.
37. S. Largergren, B.K. Svenza, Zurtheorie der sogenannten adsorption geloesterstoffe, Veternskapsakadhandlingar 24 (4) (1898) 1 – 39.
38. María del Rosario Sun-Kou; Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje, RevSoc Química Perú. 80 (4) 2014.

39. Fuente: laboratorio químico toxicológico CENSOPAS/ Instituto Nacional de Salud. Químico Manuel Ch.R. Perú-2016.

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tesis: ADSORCION DE CADMIO CON CARBON ACTIVADO

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACION	METODO DISEÑO Y DE INVESTIGACION	VARIABLES	POBLACION Y MUESTRA
¿Cuál será la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado?	Determinar la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado.	carbón activado tendrá la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa.	Tipo de Investigación: Descriptiva – transversal - Observacional	Método de la investigación: Inductivo y deductivo	Variable Independiente (Y) Y: Ion cadmio	Población: Estará constituida por el agua y sus contaminantes. Muestra: Será el ion cadmio presente en la disolución acuosa.
	Objetivos específicos	Hipótesis específicos				
	OE1 Determinar la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado a diferente temperatura.	E1 El carbón activado tendrá la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa a diferente temperatura.	Nivel de Investigación Descriptiva-transversal	Diseño de la investigación: No experimental.	Indicadores Y1: Concentración Y2: Valores Máximo Permisibles	
OE2 Determinar la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa con carbón activado a diferente PH.	E2 El carbón activado tendrá la capacidad de adsorción de cadmio en disolución acuosa a diferente PH.			Variable Dependiente (CX): X: Carbón activado	Indicadores X1: Capacidad de Adsorción X2: Tiempo de equilibrio	

Gráfico 1: Estructura porosa del carbón activado.

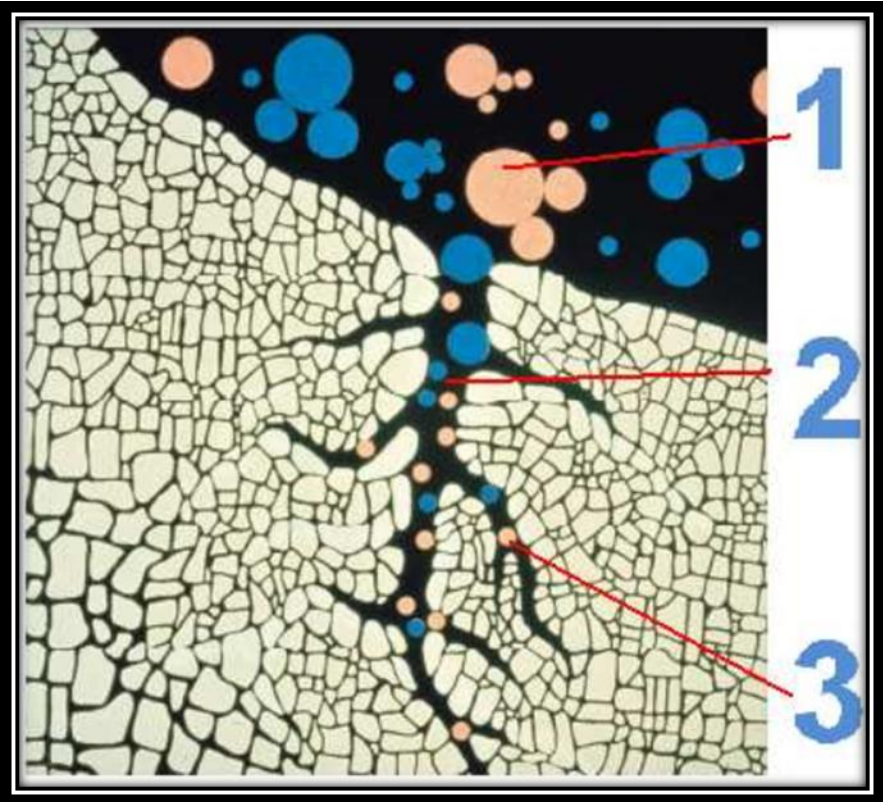


Gráfico 2: Tipos de isothermas de adsorción.

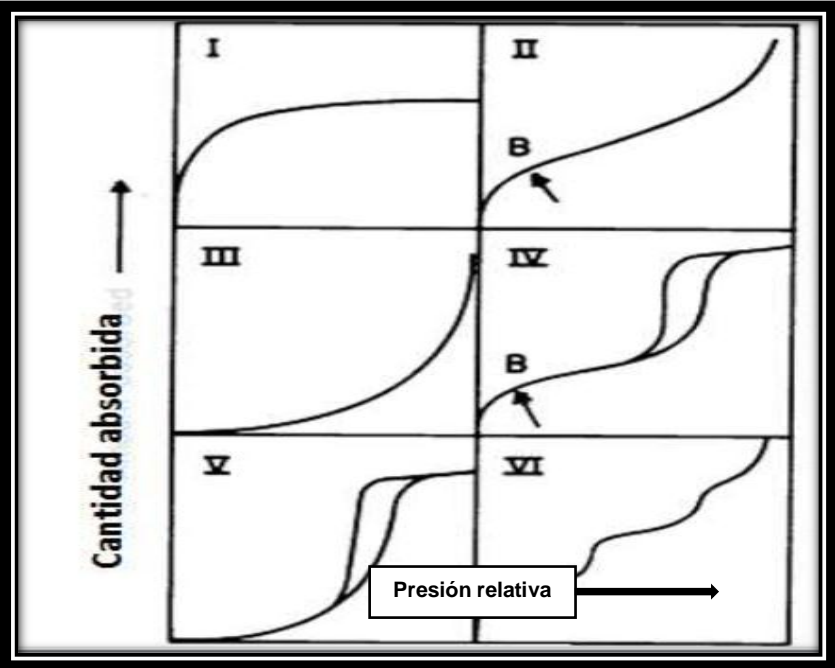


Gráfico 3: Principales isotermas de adsorción en el sistema sólido – líquido^{2, 19,20}.

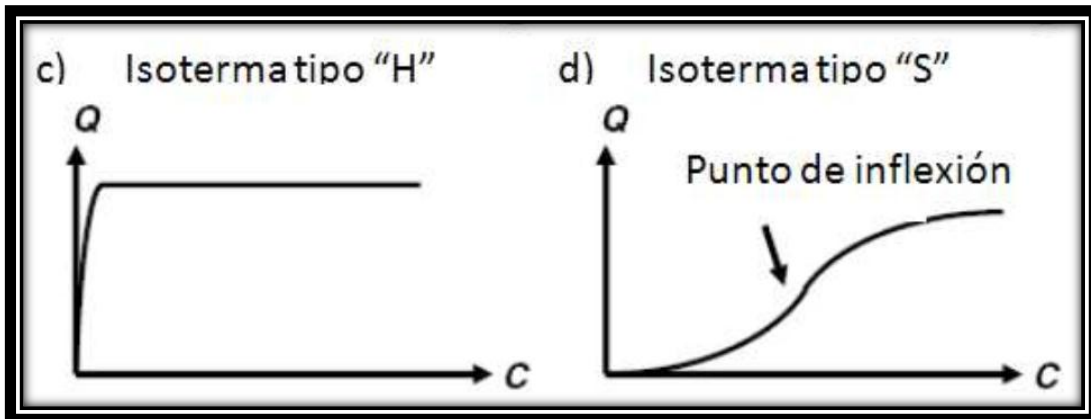
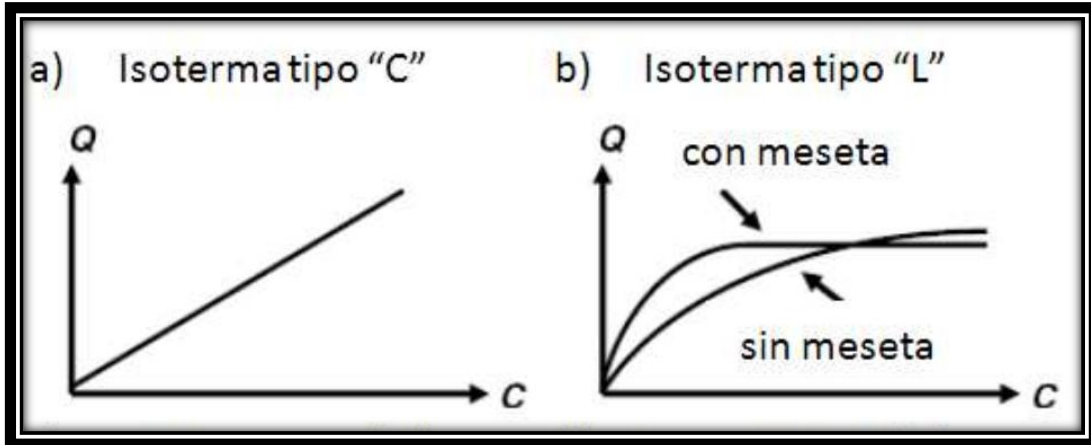


Gráfico 4: Isotermas de adsorción establecida por Giles para un sistema sólido- líquido^{8, 25}.

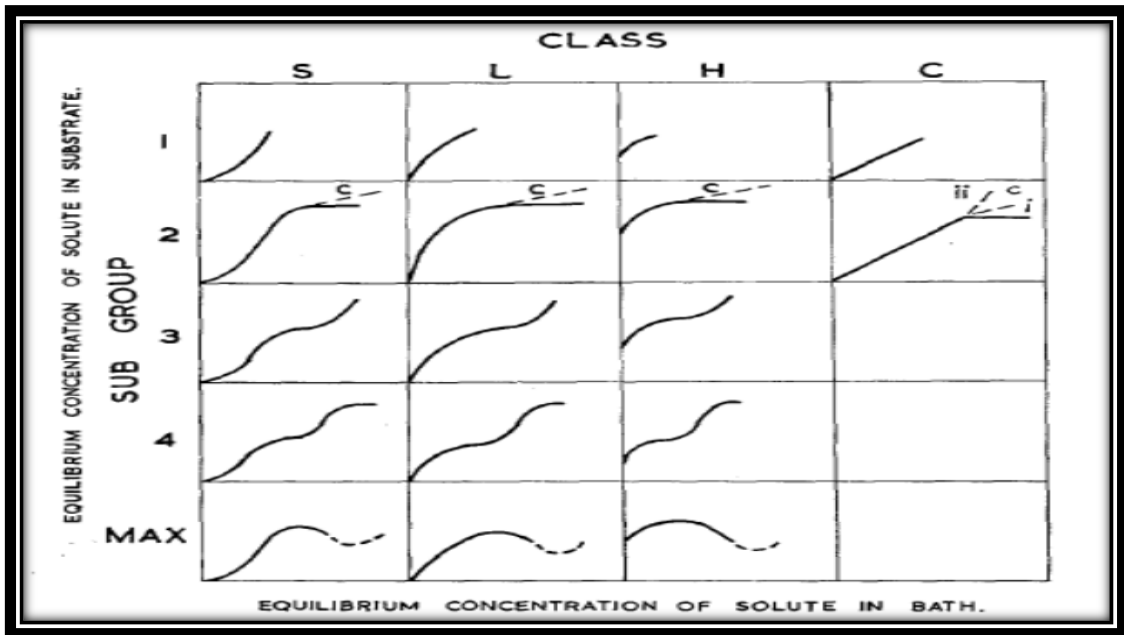


Gráfico 5: Isotermas de adsorción física según la IUPAC. Modelo BET.

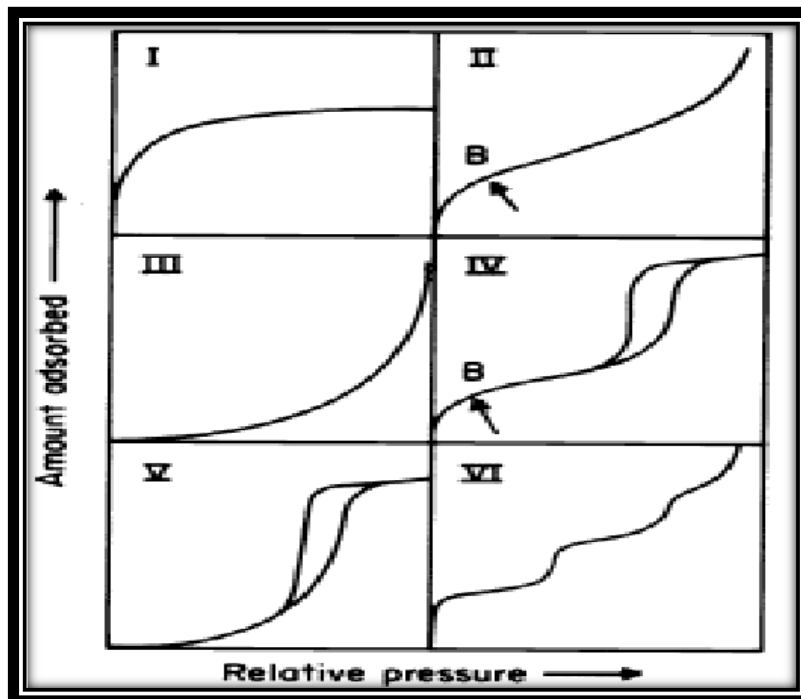


Gráfico 6: Carbón activo granular y polvo



Gráfico 7: Representación esquemática de los principales grupos superficiales.

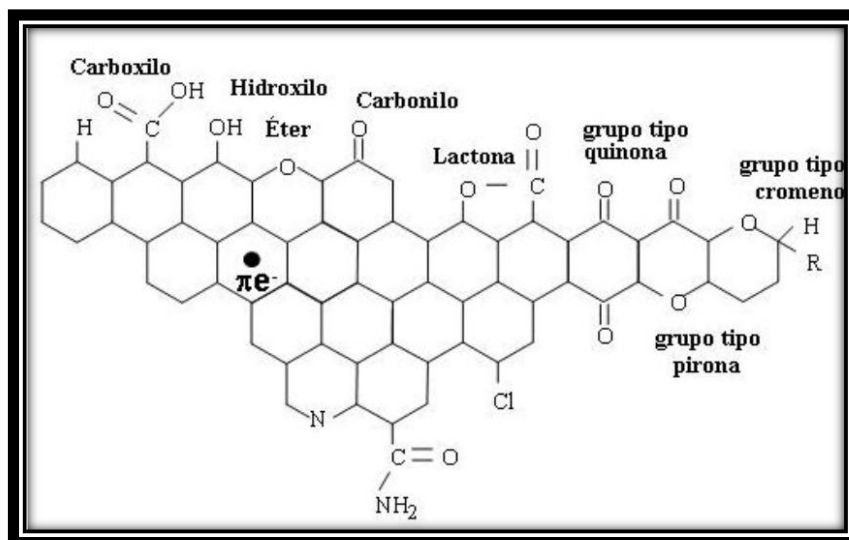


Gráfico 8: Representación esquemática de los principales grupos superficiales dentro un poro y los puentes de hidrógeno que forman las moléculas de agua con ellos y entre sí.

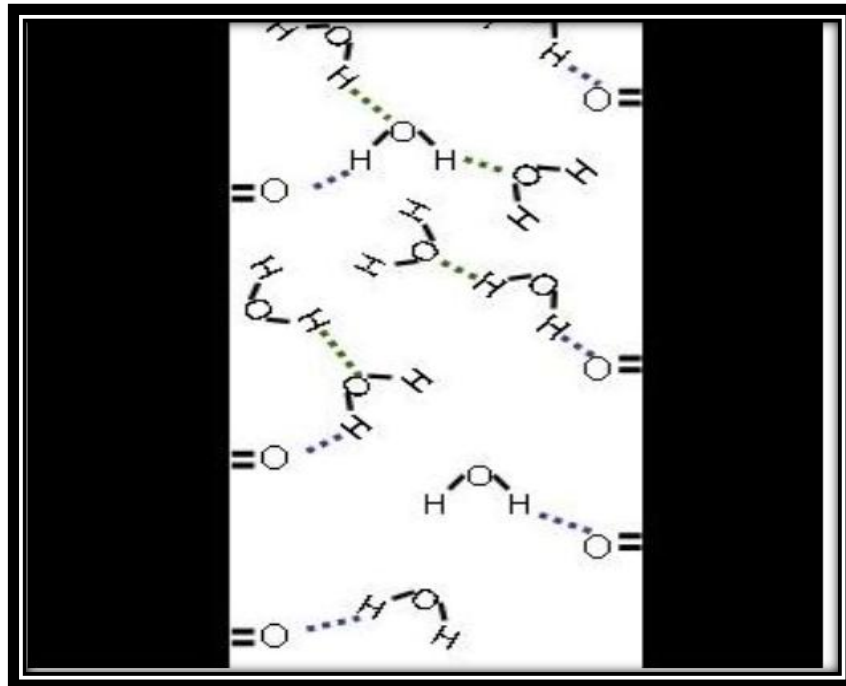


Gráfico 9: Representación esquemática del carácter ácido de algunos grupos oxigenados y básico de los electrones deslocalizados del plano basal y de grupos oxigenados.

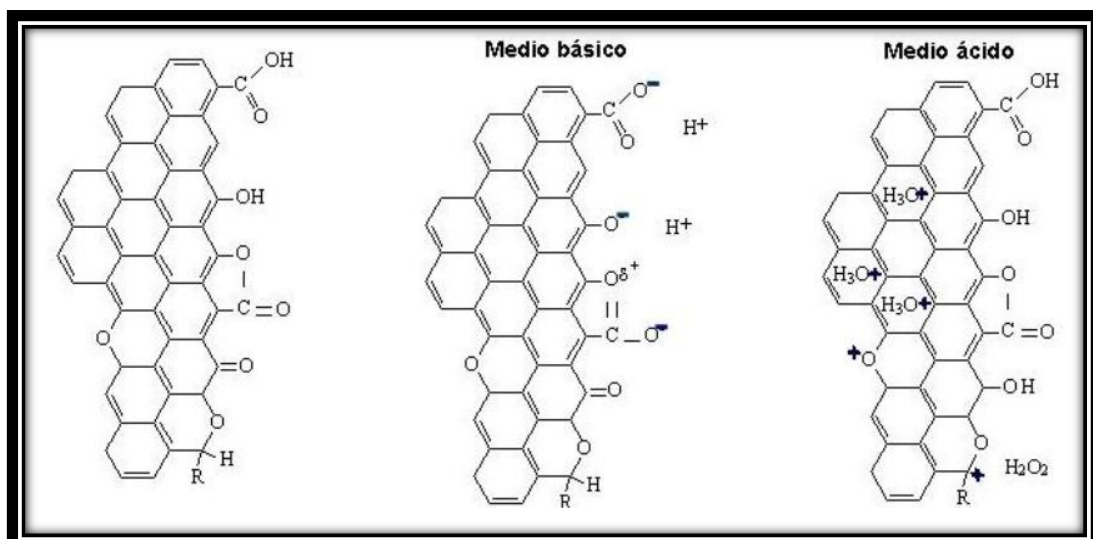


Gráfico 10: Reacción química donde se elimina átomos de carbono.

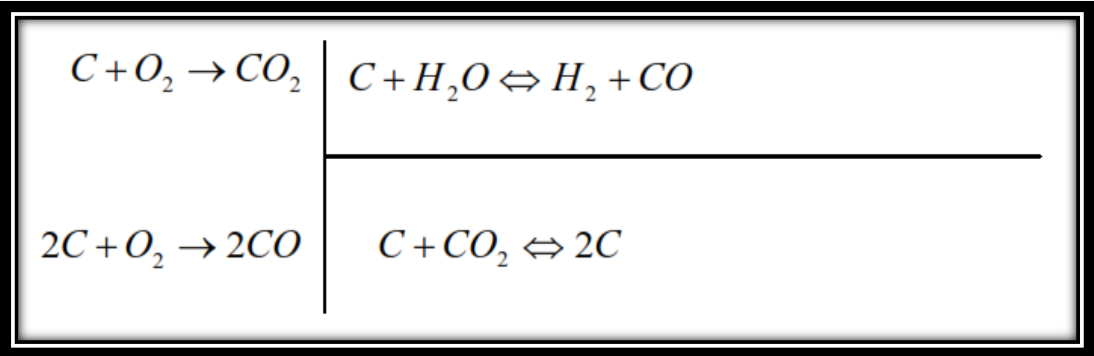


Gráfico 11: Estructura de carbón

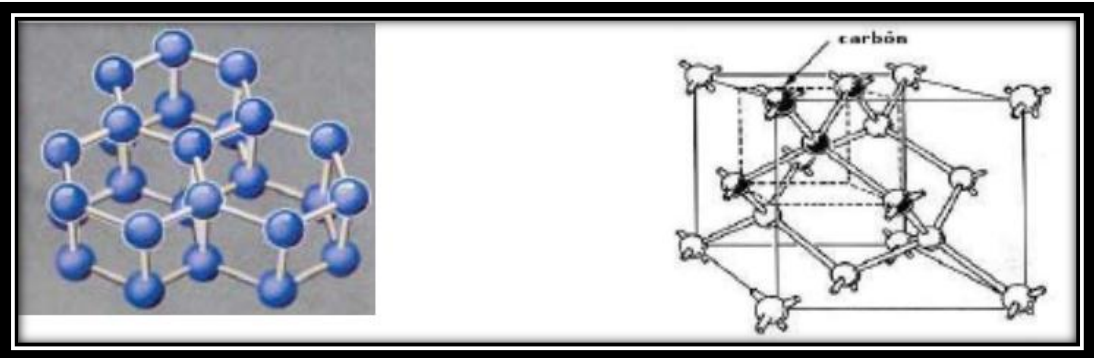


Gráfico 12: Placas graníticas

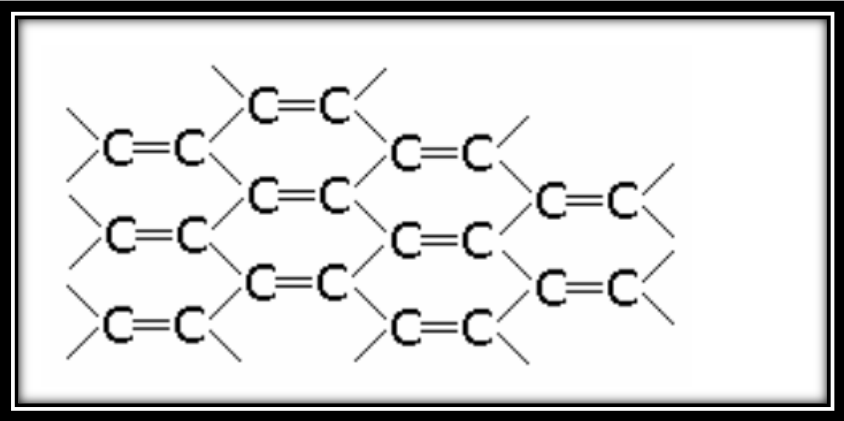


Gráfico 13: Formas y formatos de carbón activado



Gráfico 14: Ciclo de histéresis según la clasificación de la IUPAC¹⁸.

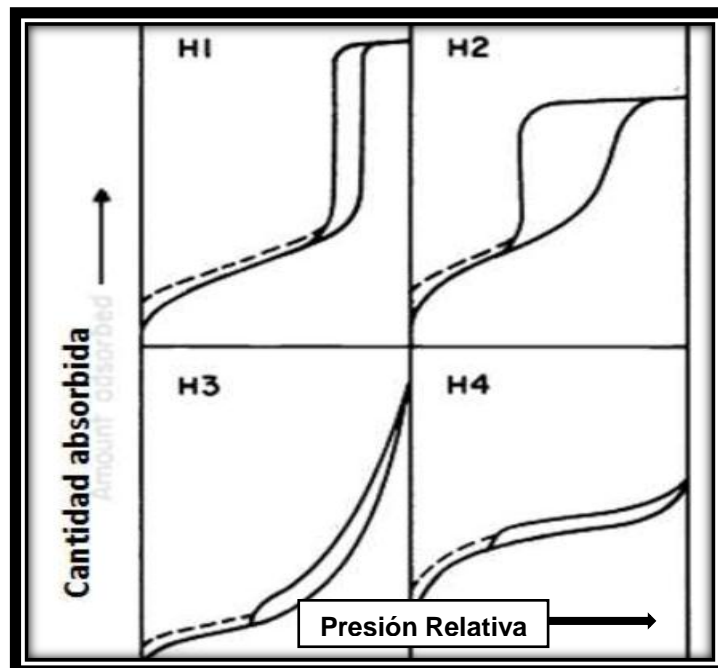


Gráfico 15: Isoterma Típica de Disolución

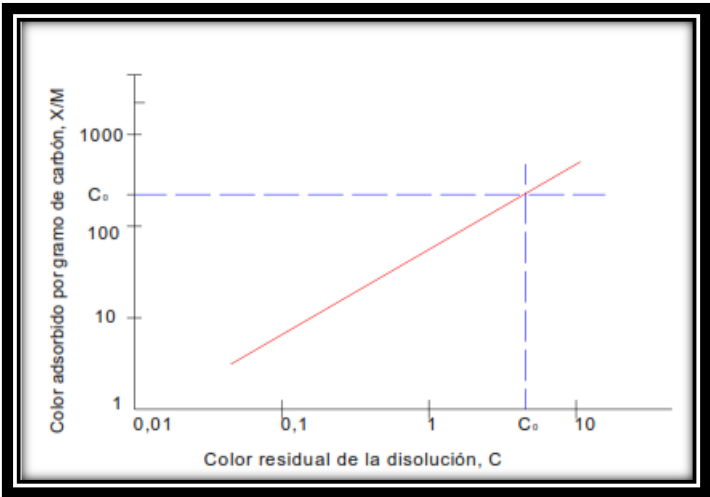


Gráfico 16: Macroporos y Mesoporos en los gránulos de carbón activado.

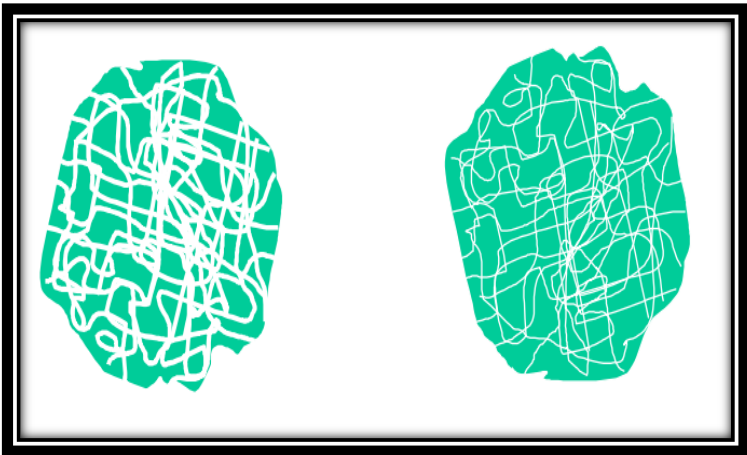


Gráfico 17: Principales materias primas y tecnologías de activación utilizadas en la producción.

MATERIA PRIMA	ACTIVACIÓN	DUREZA O RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	TAMAÑO DE POROS
MADERA DE PINO	DESHIDRATACION QUÍMICA ¹	30-50	MACROPOROSO
MADERA DE PINO	TÉRMICA ²	40-60	MESOPOROSO
CARBÓN MINERAL BITUMINOSO	TÉRMICA ²	70-80	MESOPOROSO
CONCHA DE COCO	TÉRMICA ²	90-99	MICROPOROSO

Gráfico 18: Isotherma de adsorción del ión cadmio²⁺.

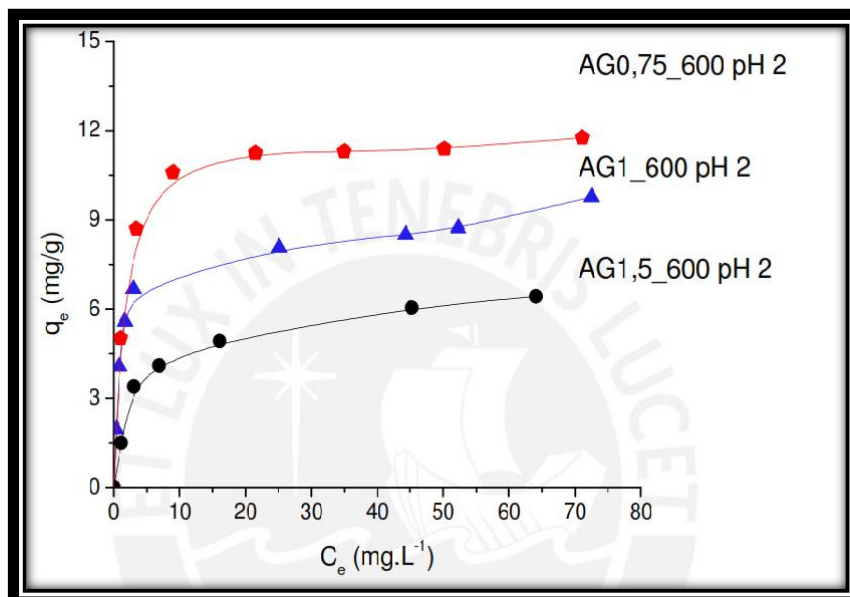


Gráfico 19:Curvas cinéticas de adsorción de fenol con carbón activado⁸. A 0.1g de CA; Co de fenol 100ppm, pH de solución 5.5.

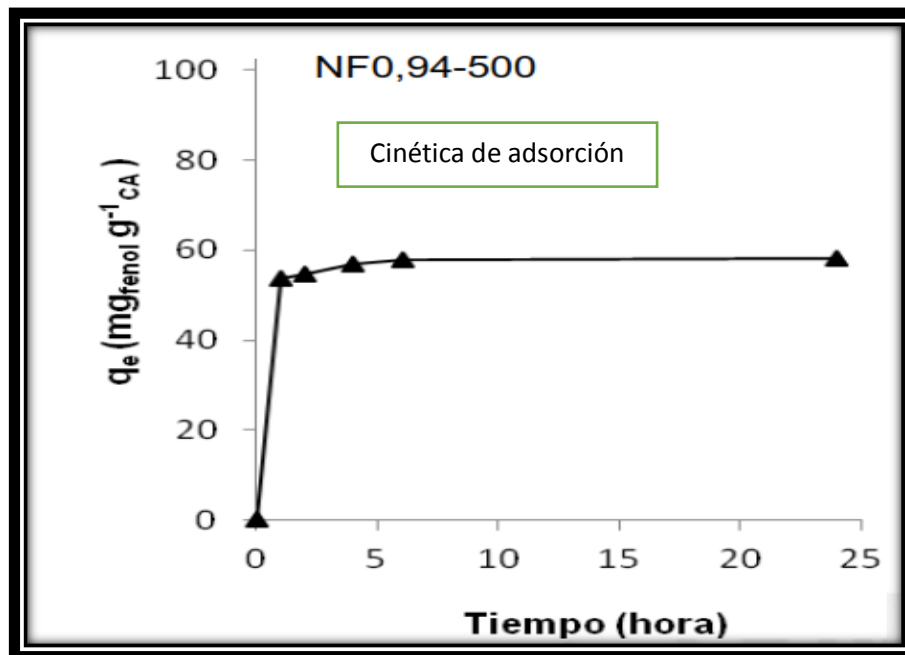


Gráfico 20:Curvas cinéticas de adsorción de fenol con carbón activado⁸. Modelo de pseudo primer orden. A 0.1g de CA; Co de fenol 100ppm, pH de solución 5.5.

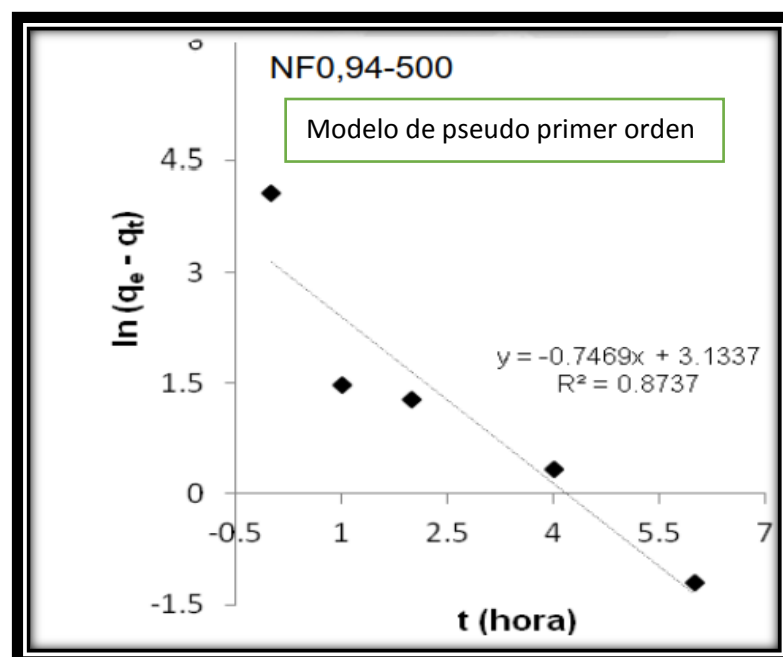


Gráfico 21: Curvas cinéticas de adsorción de fenol con carbón activado⁸. Modelo de pseudo segundo orden. A 0.1g de CA; Co de fenol 100ppm, pH de solución 5.5.

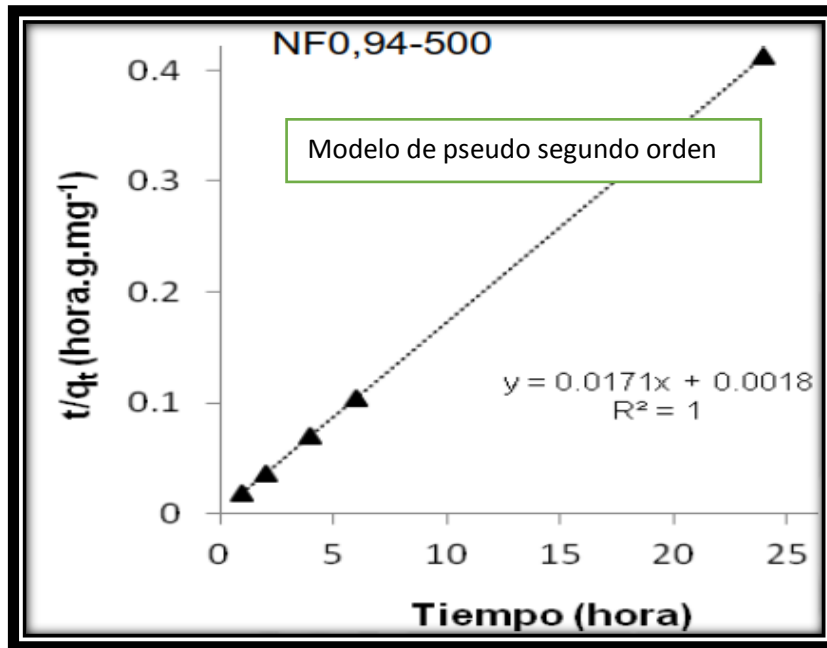


Gráfico 22: Curvas cinéticas de adsorción de la serie AG a distintas temperaturas².

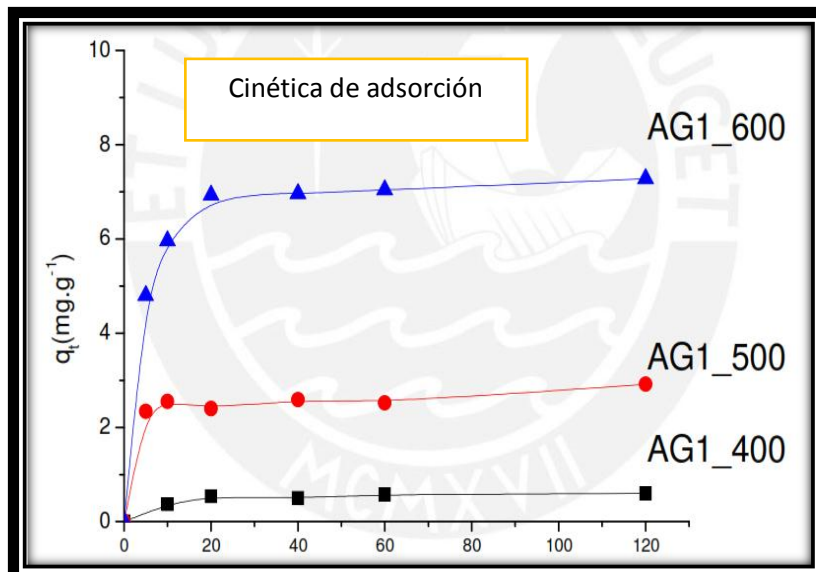


Gráfico 23: Curvas cinéticas de adsorción de la serie AG a distintas temperaturas². Según el modelo de pseudo primer orden.

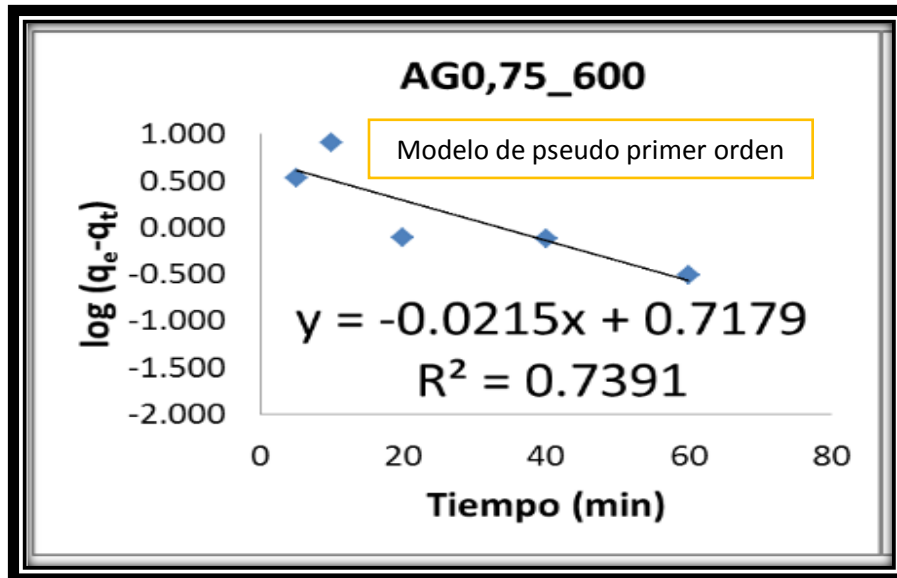


Gráfico 24: Curvas cinéticas de adsorción de la serie AG a distintas temperaturas². Según el modelo de pseudo segundo orden.

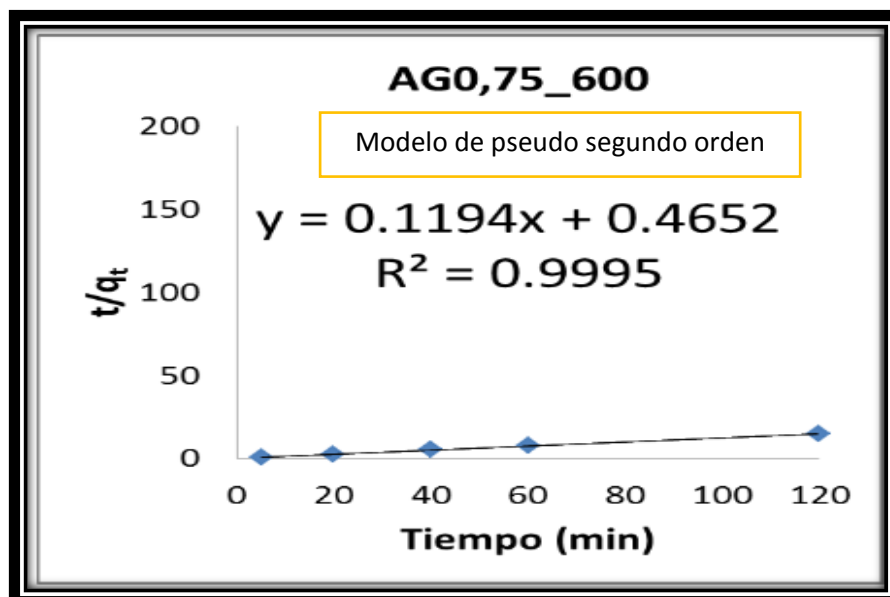


Gráfico 25: Curvas cinéticas de adsorción de la serie AG a distinto pH entre 2 y 5 de solución ².

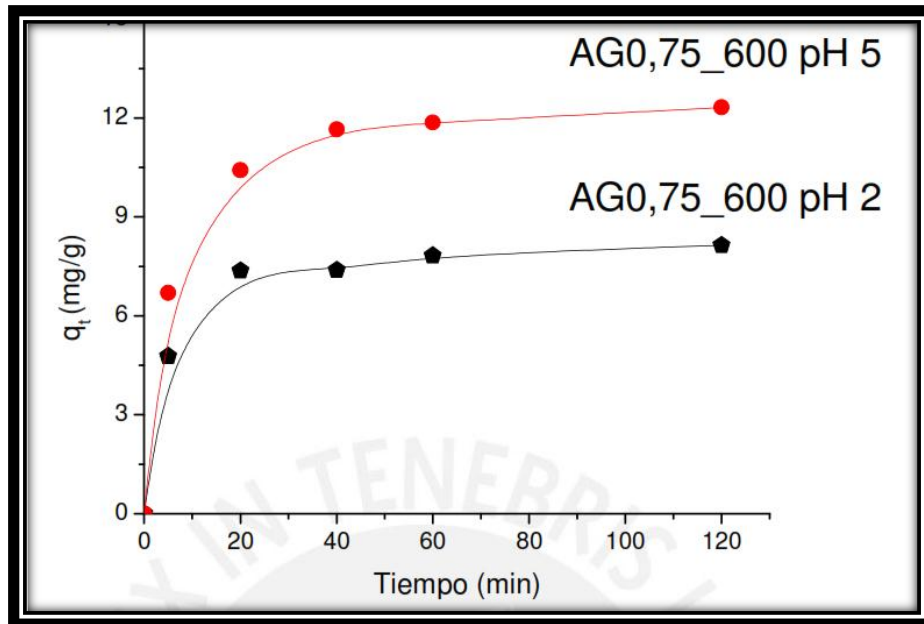


Gráfico 26: Sorción de cadmio por el carbón activado a diferentes concentraciones del sorbente.

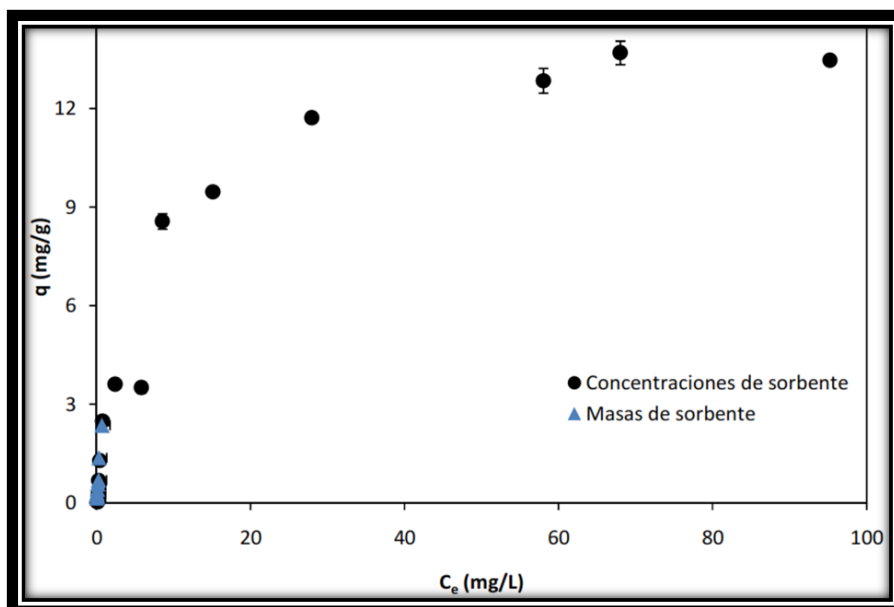


Tabla 7.: Lista de sustancias peligrosas de acuerdo a ATSDR y EPA. Año 2011.

Ranking	Nombre de sustancias	Puntos totales
1	arsénico	1665.5
2	plomo	1529.1
3	mercurio	1460.9
4	Cloruro de vinilo	1361.1
5	bifenilospoliclorados	1344.1
6	benceno	1332.0
7	cadmio	1318.7
8	Benceno pireno	1305.7
9	Hidrocarburos aromáticos policíclicos	1282.3
10	Benceno fluoranteno	1252.4
<p>El puntaje total es calculado de acuerdo a un algoritmo que considera 3 criterios.</p> <p>Puntaje total=frecuencia de ocurrencia+toxicidad+potencial de exposición</p> <p>1800 puntaje máximo 600 puntos 600 puntos 600puntos</p>		

Tabla 8. Cantidad de cadmio adsorbida por el carbón activado a diferente concentración de sorbente.

Masa (mg)	C_e (mg/L)	q (mg/g)	Desviación estándar
10	0.73	2.37	0.15
20	0.34	1.38	0.01
40	0.29	0.70	0.01
50	0.19	0.58	0.01
70	0.16	0.42	0.00
100	0.10	0.30	0.00
120	0.09	0.25	0.00
150	0.16	0.20	0.00
200	0.08	0.15	0.00

GLOSARIO

Definición de Términos Básicos

Adsorción: Adhesión de un finísimo estrato de moléculas, líquidas o gaseosas, a la superficie de sólidos (por ejemplo, carbón activo) con los que aquéllas entran en contacto.

Absorción. Cuando un gas es atraído dentro de una solución.

Adsorbato: Son aquellas sustancias absorbidas por un carbón activo o por otro material.

Adsorbente: Material, como el carbón activo, en el que se verifica el fenómeno de la adsorción.

Área superficial: Es la cantidad de superficie referida al conjunto de los poros del carbón. Se la determina en base a una isoterma de adsorción, según el método de Brunauer, Emmett y Teller (BET). Se expresa en m^2/g .

Alícuota: es aquella parte inicial que se toma de un volumen determinado, en este caso se trata de una alícuota líquida o en otro caso puede ser una masa se tratará de una alícuota sólida, en su generalidad las alícuotas resultan de repetir un volumen inicial en varias partes iguales, se puede medir en mililitros (ml) o en gramos (g).

Carbón: es un material de origen orgánico constituido básicamente por carbono. Su formación es el resultado de la condensación gradual de la materia de las plantas parcialmente descompuestas a lo largo de millones de años. Las plantas al

descomponerse forman una capa llamada turba, existen tres tipos básicos de carbón:

Lignito; se forma una vez comprimida la turba, es el carbón de menor valor calórico porque se formó en épocas recientes y contiene menos carbón (30%) y más agua. Es una sustancia parda y desmenuzable en la que se puede reconocer algunas estructuras vegetales.

Hulla; se origina por la compresión del lignito, tiene un importante poder calórico por lo que se utiliza en las plantas de producción de energía es dura y quebradiza de color negro. La concentración de carbón esta entre el 75 y 80%.

Antracita; procede de la transformación de hulla, es el mejor de los carbones con muy poco contaminante y de alto poder calórico. Arde con dificultad pero desprende mucho calor y poco humo. Es negro, brillante y muy duro. Tiene una concentración de hasta el 95% de carbono.

El término genérico de carbón se conoce a los compuestos que tienen en su composición al elemento carbono (C), ordenado regularmente. Los átomos situados en la parte exterior de la estructura cristalina disponen de fuerzas de atracción libre, lo que les permite atraer compuestos existentes en su inmediato alrededor

Gráfico 11.

Una manera sencilla de diferenciar los carbones que se encuentran en la naturaleza de aquellos que son fabricados por el hombre, es de acuerdo al ordenamiento de sus átomos, que radica en la estructura o arreglo en sus átomos, en caso del carbón activado estos se encuentran combinados en forma de placas graníticas; las placas están separadas y tienen distintas orientaciones, por lo que existen espacios entre ellas, a los que se les denomina poros a ello se debe su principal característica del

carbón **Gráfico 12.** En el extremo de mayor orden se encuentra el diamante y poco antes de este está el grafito. De acuerdo con esto un carbón estará más ordenado mientras su proceso de formación se haya llevado a cabo mayor temperatura y a mayor tiempo. Se puede encontrar en varios formatos; stick, granos, trozos e incluso en forma de esponja **Gráfico 13.**

Carbón Activo: Carbón que ha sido "activado" a alta temperatura mediante calentamiento por vapor de agua y anhídrido carbónico o agentes deshidratantes, lo que da lugar a una estructura porosa interna enormemente desarrollada. El área superficial de un carbón activo es del orden de los 1000 m² / g.

Carbonización: Proceso de formación de un material con un mayor contenido de carbono que el precursor orgánico. Suele ser un proceso de pirólisis que da lugar a un residuo carbonoso casi puro.

Desorción: Es lo opuesto a la adsorción. Se trata de un fenómeno en el que las moléculas adsorbidas abandonan la superficie del material adsorbente.

Espectrofotometría: es el método de análisis óptico más usado en el área de investigación, es la medida de la cantidad de energía radiante absorbida por la molécula de una muestra en función de las longitudes de onda específicas.

Espectroscopia de Adsorción Atómica: es un método analítico, significa la observación y el estudio del espectro o registro que se tiene de una especie tal como una molécula, un ión, o un átomo, cuando estas especies son excitadas por una fuente de energía que sea apropiada para el caso.

Espectroscopia de Adsorción Atómica en horno de grafito: esta tecnología de horno de grafito fue resultado de la necesidad de contar con una técnica que se empleara volúmenes mínimos de la muestra.

El espectrómetro de adsorción atómica con cámara de grafito (GFAA) permite trabajar con muestras de volumen muy reducido.

Por su elevada sensibilidad (niveles de ppb), la técnica se aplica en la detección de metales en productos de alta pureza como por ejemplo fármacos, alimentos, productos industriales y también en aguas de bebida y de acuíferos (determinación de la presencia de Cu, Cd, Pb, As, Hg, etc).

Fisisorción: este tipo de adsorción es la más común, donde no existe intercambio de electrones entre el adsorbente y el adsorbato lo que permite que el proceso sea reversible.

Histéresis: Es un efecto de condensación capilar en los poros de la superficie del adsorbente, por lo general es asociado con los sólidos mesoporosos. La diferencia entre la curva de adsorción y desorción de algunas isothermas genera un ciclo de histéresis **Gráfico 14**. La histéresis se presenta cuando hay adsorción física en multicapas en las isothermas. La forma del ciclo de histéresis está relacionada con la estructura específica de los poros, la IUPAC los clasifica como tipo H1, H2, H3 y H4¹⁸.

El tipo H1 se asocia a aglomerados de forma esférica que tiene cierto grado de orden y poseen una distribución de tamaños de poros estrecha (cilíndricos). El tipo H2 se forma en materiales que presentan poros en forma de cuello de botella y se atribuye a los diferentes mecanismos de condensación y evaporación que ocurre en poros con cuellos estrechos y cuerpos anchos. El tipo H3 se observa en materiales

con agregados de partículas que presenta poros en forma de láminas. El tipo H4 se encuentra en estructuras porosas con forma de láminas pero muy estrechas, indicando la presencia adicional de microporos.

Isoterma de adsorción: Es la medida de la capacidad de adsorción en función de la concentración de la sustancia adsorbida (adsorbato) a una temperatura preestablecida. Puede representarse como una curva en un diagrama en el que se representa la cantidad adsorbida por unidad de peso del adsorbente, y la concentración en el punto de equilibrio adsorbato **Gráfico 15.**

Lignocelulósicos: Es un material compuesto por celulosa, hemicelulosa y lignina, presenta una dureza y densidad muy apropiada para soportar un tratamiento químico y físico a fin de obtener un carbón activado de mayor calidad.

Macroporos: Se llaman así a los poros contenidos en el carbón activo cuyo diámetro sea superior a los 500 Angstroms.

Mesoporos: Poros contenidos en el carbón activo cuyo diámetro queda comprendido entre los 500 y los 30 Angstroms.

Microporos: Poros contenidos en el carbón activo cuyo diámetro sea inferior a 30 Angstroms.

Masa: es una medida de cantidad de materia que contiene un cuerpo y no varía en su posición.

Proceso de adsorción: los átomos en la superficie de un sólido atraen y retienen moléculas de otros compuestos. Estas fuerzas de atracción son conocidas como "fuerzas de Van Der Waals". Por lo tanto al ser un fenómeno que ocurre en la

superficie mientras mayor área superficial disponible encuentre en el sólido, mejor adsorbente será.

Quimiadsorción: Adsorción en la que las fuerzas de enlace que ligan las moléculas del adsorbato a la superficie del adsorbente son de naturaleza química (valencias) en lugar de físicas (Van der Waals).

Quimisorción: este tipo de adsorción es la menos frecuente, suele ser irreversible debido a que ocurren modificaciones en las estructuras químicas del adsorbato y del adsorbente.

Reactivación: Restablecimiento de la capacidad de adsorción de un carbón saturado. Puede efectuarse mediante tratamiento térmico, físico o químico.

Sorción: se debe a la dificultad de diferenciar la adsorción física de la adsorción química, y se emplea para describir el mecanismo por el cual la materia orgánica se adhiere al carbón activado.

FILTRASORB® 400

Granular Activated Carbon

Applications



FILTRASORB 400 activated carbon can be used in a variety of liquid phase applications for the removal of dissolved organic compounds. FILTRASORB 400 has been successfully applied for over 40 years in applications such as drinking and process water purification, wastewater treatment, and food, pharmaceutical, and industrial purification.

Description

FILTRASORB 400 is a granular activated carbon for the removal of dissolved organic compounds from water and wastewater as well as industrial and food processing streams. These contaminants include taste and odor compounds, organic color, total organic carbon (TOC), and industrial organic compounds such as TCE and PCE.

This activated carbon is made from select grades of bituminous coal through a process known as reagglomeration to produce a high activity, durable, granular product capable of withstanding the abrasion associated with repeated backwashing, hydraulic transport, and reactivation for reuse. Activation is carefully controlled to produce a significant volume of both low and high energy pores for effective adsorption of a broad range of high and low molecular weight organic contaminants.

FILTRASORB 400 is formulated to comply with all the applicable provisions of the AWWA Standard for Granular Activated Carbon (B604) and Food Chemicals Codex. This product may also be certified to the requirements of ANSI/NSF Standard 61 for use in municipal water treatment facilities. Only products bearing the NSF Mark are certified to the NSF/ANSI 61 - Drinking Water System Components - Health Effects standard. Certified Products will bear the NSF Mark on packaging or documentation shipped with the product.

Features / Benefits

- Produced from a pulverized blend of high quality bituminous coals resulting in a consistent, high quality product.
- Carbon granules are uniformly activated through the whole granule, not just the outside, resulting in excellent adsorption properties and constant adsorption kinetics.
- The reagglomerated structure ensures proper wetting while also eliminating floating material.
- High mechanical strength relative to other raw materials, thereby reducing the generation of fines during backwashing and hydraulic transport.
- Carbon bed segregation is retained after repeated backwashing, ensuring the adsorption profile remains unchanged and therefore maximizing the bed life.
- Reagglomerated with a high abrasion resistance, which provides excellent reactivation performance.
- High density carbon resulting in a greater adsorption capacity per unit volume.

Specifications¹

FILTRASORB 400

Iodine Number, mg/g	1000 (min)
Moisture by Weight	2% (max)
Effective Size	0.55–0.75 mm
Uniformity Coefficient	1.9 (max)
Abrasion Number	75 (min)
Screen Size by Weight, US Sieve Series	
On 12 mesh	5% (max)
Through 40 mesh	4% (max)

¹Calgon Carbon test method

Typical Properties*

FILTRASORB 400

Apparent Density (tamped)	0.54 g/cc
Water Extractables	<1%
Non-Wetttable	<1%

*For general information only, not to be used as purchase specifications.

Safety Message

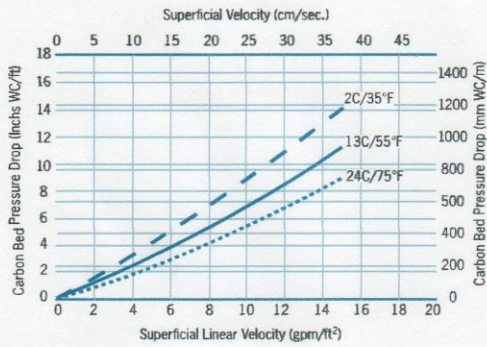
Wet activated carbon can deplete oxygen from air in enclosed spaces. If use in an enclosed space is required, procedures for work in an oxygen deficient environment should be followed.

1.800.4CARBON calgoncarbon.com

© Copyright 2015 Calgon Carbon Corporation, All Rights Reserved
DS-FILTRA40015-EIN-E1

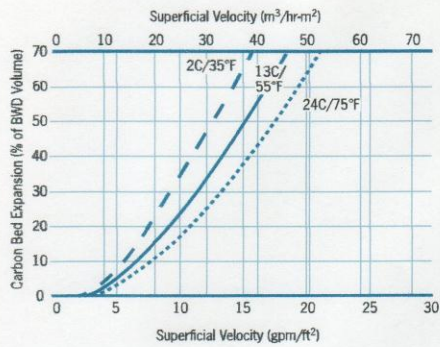
Typical Pressure Drop

Based on a backwashed and segregated bed



Typical Bed Expansion During Backwash

Based on a backwashed and segregated bed



Design Considerations

FILTRASORB 400 activated carbon is typically applied in down-flow packed-bed operations using either pressure or gravity systems. Design considerations for a treatment system is based on the user's operating conditions, the treatment objectives desired, and the chemical nature of the compound(s) being adsorbed.

Safety Message

Wet activated carbon can deplete oxygen from air in enclosed spaces. If use in an enclosed space is required, procedures for work in an oxygen deficient environment should be followed.

1.800.4CARBON calgoncarbon.com

© Copyright 2015 Calgon Carbon Corporation. All Rights Reserved
DS-FILTRA40015-EIN-E1